

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ISABELLA FRANÇOSO REBUTINI FIGUEIRA

TECTÔNICA DEFORMADORA DO DOMO DE MONTE ALEGRE - PARÁ.

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Salamuni

Co-orientador:
Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira
Dr. Sidnei Pires Rostirolla

**CURITIBA
2011**

Figueira, Isabella Françoso Rebutini
Tectônica deformadora do domo de Monte Alegre - Pará / Isabella
Françoso Rebutini Figueira. – Curitiba, 2011.
150 f. : il.; tabs.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.
Orientador: Eduardo Salamuni
Coorientador: Francisco José Fonseca Ferreira, Sidnei Pires Rostirolla

1. Geologia estrutural. 2. Geofísica. 3. Amazonas, Rio, Bacia. I.
Salamuni, Eduardo. II. Ferreira, Francisco José Fonseca. III. Rostirolla,
Sidnei Pires. IV. Título.

CDD: 551.8

TERMO DE APROVAÇÃO

ISABELLA FRANÇOSO REBUTINI FIGUEIRA

"Tectônica deformadora do Domo de Monte Alegre - Pará"

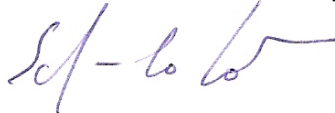
Tese de doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:


Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - UFPA


Dr. Adriano Roessler Viana – PETROBRAS


Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR


Prof. Dr. Leonardo Fadel Cury – UFPR


Prof. Dr. Eduardo Salamuni – UFPR
Presidente

Curitiba, 21 de novembro de 2011

"Affirmatio unius non est negativo alterius"
Aristóteles (384-322 a.c)

"A afirmação de uma coisa não é a negação de outra."

Agradecimentos

Nesta pesquisa científica foram realizadas diversas atividades e muitas delas somente foram concluídas com a contribuição de diversas pessoas, as quais gostaria de demonstrar meu reconhecimento.

Durante a realização desta pesquisa, tive a oportunidade de conviver com pesquisadores do meio docente da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Entre estes gostaria de agradecer o professor Fernando Mancini pelo total apoio nas atividades desenvolvidas, pelas atividades de campo e coleta de dados e pelas sugestões e críticas acerca do trabalho; o professor Sidnei Pires Rostirolla a quem devo a motivação inicial que me levou à realização desta tese e muito contribuiu nas discussões iniciais, no auxílio na atividade de campo e na análise de imagens; o co-orientador Francisco José Fonseca Ferreira pelas discussões e interpretações geofísicas e levantamento geofísico terrestre; o professor Eduardo Salamuni, por ter aceitado o desafio de me orientar neste tema, pelas fundamentais e oportunas discussões e sugestões ocorridas no desenvolvimento deste estudo, pelas incansáveis revisões do texto final e especialmente pela dedicação, confiança e ensinamentos que contribuíram significativamente para o aprimoramento desta Tese.

À Banca de Qualificação, composta pelos Prof. Dr. Alberto Pio Fiori (UFPR) e Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro que apresentaram valiosas e essenciais sugestões ao texto do Exame de Qualificação.

Agradeço aos integrantes do LABAP – Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica e do Projeto CATEA, entre estes Thais Borba Santos pelas atividades de campo, discussões e companheirismo, Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo, pelas discussões acerca da geofísica e levantamento de dados geofísicos em campo, pelos colegas que integraram na equipe de levantamento de campo Kaluan Virmond Juk, João Felipe Sus e Edimar Perico, Bárbara Carolina Dressel, Guilherme Arruda, José Bazille, Marco A. Thoaldo, André Luis Spsila e finalmente aos professores Carlos Eduardo M. Barros, Cristina Valle Pinto Coelho, Cristina Silveira Veja.

Agradeço a PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S/A por intermédio do PROFEX – Programa Tecnológico em Fronteiras Exploratórias pela confiança depositada neste estudo, bem como pelo apoio financeiro ao projeto. Agradeço

também ao geólogo Dr. Adriano Viana pela motivação e contribuições científicas, uma pessoa admirável e atualmente um dos geólogos mais preocupados no apoio científico e financeiro junto às universidades.

Ao geólogo Joaquim Ribeiro Wanderley Filho pelas interessantes discussões verbais sobre o tema da tese, ocorridas em várias oportunidades ao longo da pesquisa.

A todo suporte acadêmico dado pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná.

Ao LACTEC que me permitiu conciliar o trabalho à participação em algumas disciplinas e aos colegas deste Instituto de Pesquisa que conviveram comigo durante uma parte da elaboração da Tese.

Em especial agradeço a minha família, Ernesto e Gabriela que foi a grande razão e alicerce para a finalização deste trabalho, eles me incentivaram muito e acreditaram na importância do estudo. Aos meus pais Dilmar e Maria Nilce, Fani e Pedro que me deram apoio e confiança ao longo destes quatro anos.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	<i>vi</i>
LISTA DE TABELAS	<i>x</i>
RESUMO	<i>xi</i>
ABSTRACT	<i>xii</i>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ÁREA DE ESTUDO	3
1.3.1 Localização e Vias de Acesso	3
2 MATERIAIS E MÉTODOS	6
2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	6
2.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO	6
2.3 TRATAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS	8
2.4 GEOPROCESSAMENTO	13
2.4.1 Banco de Dados	13
2.4.2 Análise de Imagens	15
2.4.3 Mapas Temáticos	20
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	27
3.1 GEOLOGIA E GEOTECTÔNICA REGIONAL	27
3.1.1 Domínio Erepecuru-Trombetas	29
3.1.2 Bacia do Amazonas	30
3.1.3 Domo de Monte Alegre	39
4 GEOLOGIA DO DOMO DE MONTE ALEGRE	42
5 MORFOESTRUTURAS	59
5.1 ANÁLISE DE DRENAGENS	61
5.2 LINEAMENTOS REGIONAIS COM BASE EM MODELO SRTM 90 M	64
5.2.1 Mapas de Atributos de Lineamentos	70
5.3 ANÁLISE EM FOTOGRAFIAS AÉREAS	75
6 GEOFÍSICA	83
6.1 GEOFÍSICA REGIONAL	83
6.1.1 Magnetometria	83
6.1.2 Gravimetria	85

6.2	GEOFÍSICA TERRESTRE	88
6.3	SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA	88
6.4	GAMAESTPECTROMETRIA	92
7	ANÁLISE ESTRUTURAL	98
7.1	ANÁLISE GEOMÉTRICA	98
7.2	ANÁLISE DINÂMICA	109
8	DISCUSSÃO	131
9	CONCLUSÃO	142
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1

Figura 1.1: Localização e acesso à área de Monte Alegre estado do Pará	4
Figura 1.2: a) Embarcação tipo “recreio” e b) lancha que faz a linha Santarém – Monte Alegre.	5

Capítulo 2

Figura 2.1: Mapa de localização dos pontos descritos durante as atividades de campo.....	7
Figura 2.2: Obtenção das tensões pelo critério de Mohr-Colomb.. ..	9
Figura 2.3: Painel de entradas dos dados do programa Sigmas	10
Figura 2.4: Visualização do resultado dos dados processados pelo programa Sigmas.	10
Figura 2.5: Página da entrada dos dados do programa Win_Tensor (Dr. Damien Delvaux).	11
Figura 2.6: Cálculo das regiões compressivas e distensivas pelo método dos diedros retos.....	12
Figura 2.7: Estereogramas dos dados dos planos e estrias realizados pelo <i>Win_Tensor</i>	12
Figura 2.8: Modelo Riedel, (1929) das fraturas teóricas sob cisalhamento simples.	13
Figura 2.9: Exemplo da integração de diversas bases de dados.	14
Figura 2.10: Modelo SRTM 90m, com iluminação Norte, da região estudada.	17
Figura 2.11: Imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cenas 227/61, 226/61 e 228/61, RGB (5,4,3).	18
Figura 2.12: Fotos aéreas escala (1:8.000).....	19
Figura 2.13: Método de análise dos lineamentos por grade, no programa LinAnalyst.....	21
Figura 2.14: Exemplo das etapas da aplicação das ferramentas utilizadas para o cálculo.	22
Figura 2.15: Feições de relevo associadas ao regime transcorrente (SUMMERFIELD, 1993).	23
Figura 2.16: Apresentação dos padrões básicos de drenagem. Guerra, (1993).....	24
Figura 2.17: Classificação das formas anômalas de drenagem modificado de Soares <i>et al.</i> , (1982)...	25
Figura 2.18: Mapa de declividade em porcentagem do Domo de Monte Alegre.....	26

Capítulo 3

Figura 3.1: Domínios Geotectônicos propostos por Vasquez <i>et al.</i> , (2008).	28
Figura 3.2: Distribuição da exposição de rochas com idades fanerozóicas, proterozóicas.....	28
Figura 3.3: Mapa Geológico da região estudada.....	29
Figura 3.4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas e embasamento.....	31
Figura 3.5: Localização da região da Mulata, que situa-se à aproximadamente 30 km sentido Norte.	37
Figura 3.6: A) Mapa Geológico de detalhe da área do Domo do Monte Alegre.	41

Capítulo 4

Figura 4.1: Mapa geológico da região do Domo de Monte Alegre.....	43
Figura 4.2: Perfil esquemático do Domo de Monte Alegre com orientação SW/NE	43
Figura 4.3: Afloramento de arenitos da Formação Manacapuru com marcas onduladas.....	44
Figura 4.4: Plano com marcas onduladas localizado na pedreira do ponto MA-07	45
Figura 4.5: Afloramento ritmitos pelíticos na base e ritmitos arenosos para o topo.....	46
Figura 4.6: Folhelho da Formação Barreirinha, localizado no ponto MA-50	47
Figura 4.7: Siltitos esverdeados da Formação Curiri do ponto MA-34	47
Figura 4.8: Siltitos com tons arrouxeados e amarelados encontrado na borda norte/nordeste	48
Figura 4.9: Laminação tipo <i>flaser</i> encontrado nos arenitos da Formação Oriximiná.	48
Figura 4.10: Siltitos da Formação Oriximiná encontrado no ponto MA-64	49
Figura 4.11: Siltitos da Formação Faro encontrados no ponto MA-70	50
Figura 4.12: (A) Leitos com formas linguóides. (B) desenho esquemático das formas de leitos.....	50
Figura 4.13: Estratificação cruzada de médio porte, localizada na margem do Igarapé Açu.....	51
Figura 4.14: Arenitos da Formação Monte Alegre com presença de marcas onduladas.....	51
Figura 4.15: Arenitos com grãos sub-arredondados, com esferecidade alta e estratificação.	52
Figura 4.16: Localização do ponto MA-20 com destaque em caixa amarela.....	53
Figura 4.17: Vista geral da frente de lavra da pedreira Calpará, ponto MA-20.....	53
Figura 4.18: a) Calcário calcítico com nível onde ocorrem pedaços de conchas e b) tubos verticais. .	54
Figura 4.19: Folhelhos cinza arroxeados localizado na pedreira Calpará – ponto MA-20.....	54
Figura 4.20: Topo da sequência descrita no ponto MA-20.	55
Figura 4.21: Figura de localização do ponto MA-21 (54°7'45,66"W / 1°52'12,69"S)	56
Figura 4.22: Ponto MA-21 – Soleira de gabros com presença de arenitos finos no topo.	56
Figura 4.23: Crescimento de veio de quartzo euédrico ortogonal ao plano de fratura.	57
Figura 4.24: Arenito de cor rósea com estratificação cruzada.	57
Figura 4.25: Estratificação cruzada tabular na serra do Pilão, localizada na região sul do DMA.	58

Capítulo 5

Figura 5.1: Crista com alinhamento N-S, observada a partir da Serra do Ererê.	60
Figura 5.2: a) foto da borda do domo; b) Imagem SRTM do Domo de Monte Alegre	60
Figura 5.3: Detalhe da região central do Domo de Monte Alegre e ao fundo a Serra do Itauajuri	61
Figura 5.4: Drenagem teórica extraída na região de Monte Alegre.....	63
Figura 5.5: Feições lineares obtidas do modelo SRTM da região de Monte Alegre.....	65
Figura 5.6: Modelo SRTM com sobreposição do mapa hipsométrico.....	66
Figura 5.7: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 1 e 2. Número de medidas – 2.703.....	66
Figura 5.8: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 1. Número de medidas – 802.....	66

Figura 5.9: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 2. Número de medidas – 1.908.	67
Figura 5.10: Diagramas de rosetas da frequência de direções realizado para cada setor.	68
Figura 5.11: Diagramas de rosetas da frequência de direções realizado para cada setor.	68
Figura 5.12: Diagramas de rosetas do comprimento de direções realizado para cada setor.	69
Figura 5.13: Diagramas de rosetas do comprimento com informações relativas a todas células	69
Figura 5.14: Interpretação das principais faixas (em verde) de direções presentes na área.	70
Figura 5.15: Mapa de isofrequência dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem.....	71
Figura 5.16: Mapas de contorno da somatória dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem.....	72
Figura 5.17: Mapas dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem separado por classes azimutais.....	74
Figura 5.18: Detalhe da foto aérea (escala 1:8.000) da região central do Domo de Monte Alegre.....	75
Figura 5.19: Lineamentos positivos e negativos extraídos a partir das fotos aéreas	76
Figura 5.20: Disposição da interpretação das quebras positivas e negativas de relevo.....	77
Figura 5.21: Diagramas de rosetas da frequência de direção.....	78
Figura 5.22: Diagramas de rosetas da frequência de direção.....	78
Figura 5.23: Diagramas de rosetas do comprimento.	79
Figura 5.24: Diagramas de rosetas do comprimento.	79
Figura 5.25: Zona de falha com direção N20-30W.....	80
Figura 5.26: Mapas de contorno dos lineamentos extraídos das fotografias aéreas.....	81
Figura 5.27: Síntese morfoestrutural (vista ortogonal) com base na drenagem e lineamentos	82

Capítulo 6

Figura 6.1: Mapa magnético residual da região de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011).	84
Figura 6.2: Mapa de interpretação magnética da área de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011).....	85
Figura 6.3: Mapa gravimétrico Bouguer da região de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011)	86
Figura 6.4: Lineamentos interpretados a partir do mapa gravimétrico Bouguer.....	86
Figura 6.5: Mapa de integração das interpretações das principais zonas de falhas.....	87
Figura 6.6: Medida da susceptibilidade magnética em campo.....	89
Figura 6.7: Mapa de susceptibilidade magnética e interpretação das quebras de relevo.....	90
Figura 6.8: Levantamento da susceptibilidade magnética de detalhe realizado nas bancadas.....	91
Figura 6.9: a) Mapa da Contagem total e b) Mapa da Contagem total.	94
Figura 6.10: a) Mapa das medidas do Potássio e b) Mapa das medidas do Potássio	95
Figura 6.11: a) Mapa das medidas dos teores de Tório (eTh)	95
Figura 6.12: a) Mapa das medidas dos teores de Urânio (eU).....	97

Capítulo 7

Figura 7.1: Porção do DMA..	99
Figura 7.2: Exemplos de fraturas planares identificadas em campo.	101
Figura 7.3: Exemplo de fraturas anastomosadas.	102
Figura 7.4: Exemplos de fraturas escalonadas, padrão em <i>Relay</i> e sigmoidais.	103
Figura 7.5: Estruturas <i>kink bands</i> , de origem tectônica, encontradas em zonas de falhas	104
Figura 7.6: Indicadores cinemáticos como estrias e <i>steps</i> do ponto MA-07.	105
Figura 7.7: Modelo SRTM com a localização dos pontos descritos em campo e diagramas.	106
Figura 7.8: Estereogramas sinópticos individualizados das unidades geológicas.	108
Figura 7.9: Diagramas estereográficos total das paleotensões	110
Figura 7.10: Diagramas estruturais realizados pelos programas Stereonet, Sigmas e Win_Tensor.	111
Figura 7.11: Diagramas estruturais realizados para as rochas intrusivas do evento Penatecaua	113
Figura 7.12: Esquema dos campos máximo de tensão (σ_1) das fases de deformação.	114
Figura 7.13: Diagramas sinópticos das paleotensões dos planos de falhas da Fase DN+1	117
Figura 7.14: Foto em planta. Indicadores cinemáticos com movimentos sinistrogiros.	117
Figura 7.15: Diagrama estrutural do ponto MA-01. a) Diagrama feito no programa Sigmas.	118
Figura 7.16: a) Diagrama estrutural do ponto MA-03, com os tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 .	118
Figura 7.17: Diagramas realizados das falhas do ponto MA-06.	119
Figura 7.18: Detalhe das dobras associadas à falha inversa.	119
Figura 7.19: Diagramas estruturais realizados para as falhas do ponto MA-07	120
Figura 7.20: Blocodiagrama do ponto MA-07 com a localização das juntas e falhas.	120
Figura 7.21: Diagramas estruturais do ponto MA-09, situado na porção centro-sul do DMA.	121
Figura 7.22: Diagramas estruturais do ponto MA-18	121
Figura 7.23: Diagramas estruturais do ponto MA-31.	122
Figura 7.24: Padrão em <i>relay</i> alternando um escalonamento <i>right</i> e <i>left-step</i> .	122
Figura 7.25: Diagrama dos planos de falhas estriados com cinemática normal dextrógiro	123
Figura 7.26: Vista geral do afloramento da pedreira (MA-21).	123
Figura 7.27: Detalhe do afloramento do ponto MA-21	124
Figura 7.28: Zonas de cisalhamento cataclástico identificados nas rochas da pedreira Três Bocas.	125
Figura 7.29: Diagramas estruturais das fraturas das rochas entre o Devoniano e o Carbonífero.	125
Figura 7.30: Diagramas estruturais realizados pelo Win_Tensor.	126
Figura 7.31: Diagramas sinópticos das paleotensões dos planos de falhas da Fase DN+2	127
Figura 7.32: Diagramas estruturais obtidos pelo Win_Tensor.	127
Figura 7.33: Falhas nas rochas ígneas da pedreira Três Bocas	128
Figura 7.34: Vista geral do afloramento de rocha da pedreira Três Bocas	129
Figura 7.35: Fraturas com preenchimento de quartzo	129

Capítulo 8

Figura 8.1: Modelo digital do Domo de Monte Alegre com sobreposição da drenagem.....	132
Figura 8.2: Seção esquemática de um lacólito, ilustrando a geometria plano-convexa.....	133
Figura 8.3: Mapa de contorno estrutural, esquemático ilustrando uma estrutura dômica.....	134
Figura 8.4: Lacólito com domo e falhas reversas. Modificado de Conceição <i>et al.</i> (1993).	134
Figura 8.5: Mapa de contorno estrutural esquemático, ilustrando uma estrutura em domo.....	135
Figura 8.6: Perfil esquemático da seção SW/NE, do Domo de Monte Alegre.	135
Figura 8.7: Mapa Gravimétrico ASA	136
Figura 8.8: Modelo de Riedel dos levantamentos de campo realizado na região do domo	137
Figura 8.9: Elipsóide de deformações da área do Juruá com os tipos de falhas identificados	139
Figura 8.10: Diagrama estrutural do campo de tensão máximo σ_1 proposto para a fase DN+1	139
Figura 8.11: a) Representação esquemática atual da morfoestrutura do Domo de Monte Alegre.....	140
Figura 8.12: a) Representação esquemática atual da morfoestrutura do Domo de Monte Alegre.....	141

Tabelas

Tabela 2.1: Organização dos dados estruturais com referência do n° do ponto.....	8
Tabela 6.1: Dados de entrada do levantamento geofísico terrestre	88
Tabela 6.2: Dados gamaespectrométricos (CT, K, eU e eTh).....	93
Tabela 7.1: Numeração dos pontos descritos em campo e sua respectiva unidade geológica.....	107
Tabela 7.2: Medidas dos planos de falhas e os tensores respectivos para a fase DN+1.....	116
Tabela 7.3: Medidas dos planos de falhas e os tensores respectivos para a fase DN+2.....	126

Resumo

O Domo de Monte Alegre, que se destaca em meio ao relevo da planície do rio Amazonas, é uma elevação topográfica situada na margem esquerda do rio, aproximadamente a 10 km a noroeste da cidade homônima, no estado do Pará. Esta estrutura dômica é reconhecida em imagens orbitais e a partir de sua descoberta, muitas têm sido as hipóteses para a gênese do domo, entretanto somente em 1975 Montalvão & Oliveira atribuíram a origem dômica à intrusões toleíticas básicas, que moldaram a estrutura como uma braquianticlinal com forma de elipse com 30 km de comprimento e 20 km de largura. Na sua porção central afloram rochas do Devoniano pertencentes à Formação Ererê do Grupo Urupadi em uma superfície aplainada contornada por um anel de serras que sustentam o relevo em forma de *hogbacks* e *cuestas* onde afloram rochas dos grupos Urupadi, Curuá, Tapajós, Javari e intrusões do magmatismo Penatecaua. A análise realizada em imagens Landsat, modelos SRTM, fotografias aéreas, mapa de drenagens e dados geofísicos possibilitou o reconhecimento dos lineamentos estruturais presentes no relevo que foram comparados aos dados em profundidade com mapas aerogeofísicos. As feições lineares de relevo identificadas nas escalas 1:800.000 (SRTM) e 1:8.000 (foto aérea), impressas na região do Domo de Monte Alegre apontam direções principais a NW-SE, NE-SW e algumas N-S e E-W. Esta análise permitiu ainda verificar que o domínio do domo representa o ponto de intersecção tríplice entre as direções NW, NE e N. Este cruzamento de estruturas é verificado também em profundidade através da geofísica. A direção N70E marcante no relevo limita a borda sul do domo em grande extensão e destaca-se por apresentar-se contínua e sub-paralela à calha principal do rio Amazonas. Foram identificadas anomalias morfoestruturais de drenagem com a associação de padrões anelares e radiais, compatíveis às anomalias de drenagem observadas em domos. Os trabalhos de campo permitiram reconhecer os litotipos das diversas unidades mapeadas e culminaram com um mapa geológico da região modificado onde a borda sul do domo, especificamente na Serra do Ererê e APA Paytuna, apresenta afloramentos de arenitos pertencentes apenas à Formação Alter do Chão, que em mapas anteriores era mapeado como Formação Ererê. Ainda nestes levantamentos de campo foi possível identificar que ao longo da estrutura dômica e área de entorno, ocorrem intrusões de diques e soleiras, que cortam a seção pré-cretácea, e estão associadas ao magmatismo Penatecaua. Este magmatismo é reflexo da abertura do atlântico como resposta a possíveis eventos orogênicos ocorrido na zona andina. Nesta pesquisa conclui-se que a atual estrutura elipsoidal foi produzida por uma tectônica deformadora, registrada por meio de falhas. Os levantamentos estruturais e de paleotensões, realizados pela análise de dados de campo como juntas e falhas, permitiu identificar pelo menos duas fases de deformação aqui denominadas DN+1 e DN+2. Estas foram descritas com diagramas estruturais, croquis de afloramentos e fotografias. Finalmente à estas deformações, foram atribuídas aos eventos tectônicos regionais, respectivamente ao Diastrofismo Juruá e na segunda fase, com a compressão entre os Andes e a cadeia Meso-Oceânica.

Abstract

The Monte Alegre Dome, with construct relief of the Amazon River plain, is a topographic high located on the left bank of the river, about 10 km northwest of the city of the same name, in Pará state. This structure is recognized on orbital and from its discovery, many have been the hypotheses for the genesis, however only in 1975, Montalvão & Oliveira attributed this origin of tholeiitic basic intrusions that have shaped the structure as a braquianticlinial ellipse with 30 km long and 20 km wide. In the central portion, the Devonian outcrop rocks belonging to Ererê Formation of Urupadi Group on a flat surface surrounded by a ring of mountains that sustain the relief in the form of hogbacks where rocks and groups Urupadi, Curuá, Tapajós, Javari and intrusions of the Penatecaua magmatism. The analysis of Landsat image, SRTM models, aerial photographs, drainages maps and geophysical data allowed the recognition of structural lineaments presents in the relief that were compared in depth with geophysical maps. The prominent linear features identified on the scales 1:800.000 (SRTM) and 1:8,000 (aerial photo), printed in Monte Alegre Dome region, shows main directions NW-SE, NE-SW and some NS and EW. This analysis allowed us to verify that the dome domain of the represents the triple point of intersection between the directions NW, NE and N. This combination of structures is also seen in depth by geophysics. The outstanding N70E direction in relief limited to the southern edge of the dome at great length and stands out by having to continuously and sub-parallel to the main channel of the Amazon River. Drainage morphostructural anomalies were identified with a combination of annular and radial patterns, compatible withs domes drainage anomalies. The field work allowed us to recognize different lithotypes of of several mapped units and it culminated with a modified geological map of the region where the southern edge of the dome, specifically in the Ererê Sierra and Paytuna APA presents outcrops of sandstones belonging only to the Alter do Chao Formation, which in previous maps was mapped as Ererê. Also in these surveys, we found that along and the surrounding the structure area, there are dykes and sills intrusions that cut the pre-Cretaceous section, and are associated with Penatecaua magmatism. This magmatism reflects the Atlantic opening as a possible response to orogenic events occurred in the Andean area. This research concludes that the current structure was produced by an ellipsoidal deforming tectonic recorded by faults. The structural and paleotensions surveys, conducted by field analysis dates such as joints and faults, identified at least two phases of deformation here called DN+1 and DN+2. These phases were described with structural diagrams, sketches and outcrops photographs. Finally to these deformations, were attributed to tectonic events to regional tectonic events, respectively, to diastrophism Juruá and the second phase, with the compression between the Andes and Meso-Oceanic chain.

1 INTRODUÇÃO

O Domo de Monte Alegre, que se destaca em meio ao relevo da planície do rio Amazonas, é uma elevação topográfica situada na margem esquerda do rio, a aproximadamente 10 km a noroeste da cidade homônima, no estado do Pará. Esta região montanhosa há muito tem atraído a atenção de pesquisadores, seja por suas características geomorfológicas, seja pela presença de importantes sítios arqueológicos.

Os primeiros estudos registrados sobre o domo são do século XIX, entre os anos de 1848 e 1852 por Alfred Russel Wallace¹⁸⁷⁰ e 1874 e depois por Fred Hartt, que participava de expedição científica, relatou a ocorrência de “região montanhosa, tabular, levemente arredondada, com caimentos tanto para leste quanto para oeste, com altura de cinco ou seis centenas de metros ou mais”.

Vários outros estudos se sucederam na região com finalidades científicas, como arqueologia e estratigrafia e econômicas como extração de bens minerais. Muitas foram também as hipóteses para a gênese do domo, entretanto somente em 1975 Montalvão & Oliveira atribuíram à origem dômica à intrusões toleíticas básicas, tendo sido os primeiros a denominarem a estrutura como braquianticlinal com forma de elipse com cerca de 30 km de comprimento e 20 km de largura.

Nesta região foram desenvolvidas pesquisas com intuito de definir sua origem de formação e eventos de deformação, porém estas não foram conclusivas na sua totalidade, existe ainda uma discussão quanto à sua origem. Almeida & Pinheiro (2007) atribuem ao soerguimento por intrusões um papel secundário, pois a estrutura seria fruto de inversão tectônica positiva no contexto da Bacia do Amazonas.

Desta forma, com intuito de contribuir para melhor compreensão acerca desta notável região, esta foi uma das áreas alvo escolhidas para estudos de detalhe no contexto do Projeto CATEA, firmado entre a UFPR e a Petrobras, por meio de convênio.

O presente trabalho é resultado dos estudos desenvolvidos na região, que aborda temas sobre a morfologia, gênese e tectônica deformadora do domo, e objetiva retratar as principais estruturas geológicas encontradas, suas inter-

relações e principalmente contribuir para o entendimento de uma porção da Bacia do Amazonas e suas implicações para a caracterização exploratória de hidrocarbonetos.

1.1 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA

Na região Amazônica foram realizados diversos mapeamentos geológicos, até mesmo em regiões de acesso restrito e com densa cobertura vegetal que mascara estruturas geológicas.

A região de Monte Alegre apresenta características, no que se refere à facilidade de acesso e presença de áreas naturalmente descampadas com exposição de rochas favoráveis, que facilitam o mapeamento das unidades estratigráficas e na identificação de afloramentos. No domo ocorrem ainda fontes termais, bens minerais como bauxita, calcário, diabásio e até corpos de kimberlitos (Informação da Rio Tinto Desenvolvimento Mineral-RTMD) que foram descritos por Vasquez *et al.* (2008).

A tese em questão foi elaborada com intuito de reconhecer e apresentar a tectônica deformadora do domo para definir as principais direções dos lineamentos de relevo, por meio da análise indireta via imagens orbitais, aéreas e interpretações de dados aerogeofísicos e as fases de deformação que atuaram na região por meio da investigação direta com levantamentos de campo.

Este trabalho tem uma abordagem com enfoque na estruturação do domo, onde são documentadas as principais características das juntas e falhas presentes. O arranjo geométrico das direções dos lineamentos de relevo foi obtido em várias escalas em que as feições puderam ser observadas. Para isto, foram empregados, observação de estilos estruturais mediante a análise de imagens de satélite e fotografias aéreas, e a descrição macroestrutural das zonas de falha pelos métodos de mapeamento clássico.

A compreensão dos eventos de deformação, extensão e geometria dos sistemas de fraturas é a chave para o entendimento da evolução tectônica da região e seus dados poderão auxiliar os demais trabalhos a serem realizados na Bacia do Amazonas.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa consiste em apresentar a tectônica deformadora do Domo de Monte Alegre no estado do Pará e determinar a hierarquização de eventos de deformação, utilizando como base a morfoestrutura (rede de drenagem, análise de lineamentos estruturais e perfis topográficos), o mapeamento geológico para os levantamentos estruturais e por fim a determinação das paleotensões.

Para seu desenvolvimento foram propostos os seguintes objetivos intermediários:

- ✓ Caracterizar as feições morfotectônicas da região;
- ✓ Definir o arcabouço geofísico para posterior comparação às imagens de relevo;
- ✓ Compreender as relações entre as estruturas tectônicas em escalas regionais, ou seja, na escala de observação de imagens orbitais e fotografias aéreas, com a distribuição das unidades litoestratigráficas;
- ✓ Compreender os mecanismos de deformação responsáveis pela formação das estruturas encontradas;
- ✓ Determinar os campos das paleotensões e definir as fases de deformação;
- ✓ Definir a evolução estrutural do domo.

1.3 ÁREA DE ESTUDO

1.3.1 Localização e Vias de Acesso

Conforme mencionado, a área definida para este estudo situa-se na Bacia do Amazonas, porção norte do estado do Pará, na margem norte do rio Amazonas, (Figura 1.1). A área está compreendida entre as coordenadas geográficas de longitudes 54°55'28" / 52°46'50" e latitudes 1°00'00" / 2°08'00", e engloba parte dos municípios de Santarém, Alenquer, Monte Alegre, Prainha, Porto Munhoz e Almeirim.

de Prainha (a leste), Alenquer, Óbidos e Oriximiná (a oeste). A rodovia PA-255 liga a cidade de Monte Alegre ao porto de Santana do Tapará, no vizinho município de Santarém, local da travessia do rio Amazonas, através de balsa motorizada, para sua sede urbana.

O acesso à região normalmente é feito via aérea até a cidade de Santarém e via fluvial a partir daí até a cidade de Monte Alegre. Embora a cidade disponha de um aeroporto que comporta aviões de pequeno e médio porte, não há voos regulares, apenas fretados.

Desta forma, a opção mais viável de acesso é por meio de embarcações (navio tipo “recreio”) com saídas diárias para transporte de passageiros e cargas, (

Figura 1.2a). Há também a opção de lanchas que fazem o percurso em 2 horas, em dias alternados (

Figura 1.2b). Estes meios de transporte utilizam terminais hidroviários que estão situados ao longo do rio Amazonas.



a)



b)

Figura 1.2: a) Embarcação tipo “recreio” e b) lancha que faz a linha Santarém – Monte Alegre.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

No desenvolvimento da pesquisa foram consultados trabalhos sobre o Domo de Monte Alegre. Dentre estes, destacam-se os de Hartt (1870), Issler (1974), Montalvão & Oliveira (1975), Pastana *et al.* (1978), Pastana (1999) Anjos *et al.* (2003) e Almeida & Pinheiro (2007).

Referência deve ser dada também a alguns trabalhos clássicos de geologia, que entre outros assuntos abordam aspectos de deformação e de evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Amazonas, tais como os de Lange (1967), Caputo *et al.* (1971, 1972), Caputo (1984), Rezende & Brito (1973), Cunha *et al.* (1994), Sena Costa & Hasui (2000) e Vasquez *et al.* (2008). Referências sobre aspectos neotectônicos e geofísicos podem ser encontradas, respectivamente nos trabalhos de Sena Costa *et al.* (1996), pesquisas geofísicas em Castro & Oliveira (1971), análise e sensores remotos em Miranda (1983).

Por fim, como auxílio ao desenvolvimento da tese, foram consultados trabalhos de caráter metodológico no auxílio dos trabalhos de geoprocessamento, como em De Freitas (2005).

2.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Foram realizadas duas campanhas de campo, respectivamente em julho de 2008 e em julho/agosto de 2009, nas quais foram descritos 75 afloramentos encontrados em sua maioria na área relativa ao DMA. Os demais pontos descritos situam-se na Serra Azul, localizada ao norte do domo, conforme apresentado na Figura 2.1. A primeira etapa de campo teve a duração de 10 dias e a segunda de 7 dias e contou com o auxílio e colaboração dos integrantes do projeto CATEA.

Nos levantamentos de campo foram aplicadas técnicas usuais como o planejamento do caminho percorrido (orientação cartográfica), reconhecimento dos afloramentos, identificação da coordenada do ponto através do GPS e finalmente a caracterização propriamente dita do ponto com abordagens estratigráficas e estruturais.

Em campo foram levantadas informações acerca do litotipo, direção e mergulho do acamamento e à unidade estratigráfica a qual pertence. Os levantamentos estruturais consistiram em obter dados estruturais da geometria das fraturas, seu espaçamento, medidas de juntas e falhas (planos/estrias) e identificação de indicadores cinemáticos.

Foram também caracterizados, quando possível, materiais de preenchimento destas fraturas, tanto aqueles precipitados, como calcita, quartzo quanto os gerados em zonas de *gouge*, ou seja, aquele produto da cominuição intensa dos grãos.

Todas as informações adquiridas em campo foram organizadas em tabelas, para a geração de diagramas estruturais e posteriormente para a análise estrutural sistemática (geométrica e cinemática), bem como as direções de paleotensões.

Ao longo destas etapas de campo foram adquiridas cerca de 1.100 medidas de falhas/fraturas, acamamentos e de paleocorrentes.

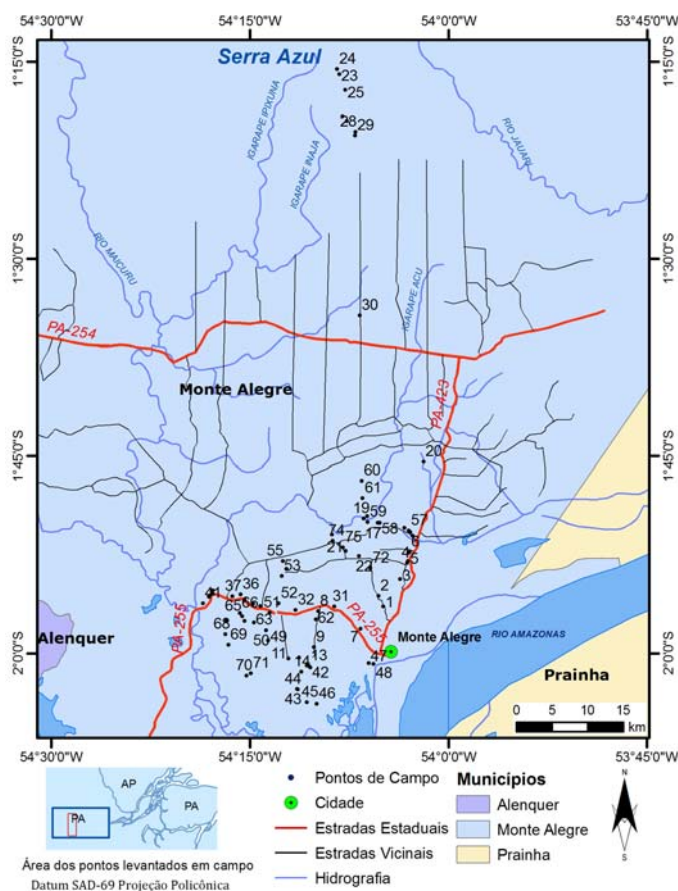


Figura 2.1: Mapa de localização dos pontos descritos durante as atividades de campo.

2.3 TRATAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS

Para fins de organização e visando facilitar as análises subsequentes os dados coletados em campo foram armazenados em planilhas eletrônicas (Tabela 2.1), contendo campos específicos, como número do ponto, coordenada geográfica, formação geológica, descrição e hierarquização temporal das fraturas, preenchimento de fraturas, medidas estruturais e medidas de acamamento.

Tabela 2.1: Organização dos dados estruturais com referência do n° do ponto, coordenada UTM, azimuth e mergulho da fratura, tipo do dado medido, unidade estratigráfica pertencente, o tipo da rocha e dados cinemáticos.

Projeto Amazonas				Tipo		Ce		Ex		FS	
Planilha com Diagramas Estruturais				A	achatamento	CF	Clivagem espaçada	FL	Falha	Fu	Fluxo
Medidas tipo "Clar" (azimute e inclinação do mergulho do plano)				AC	Acamamento	CR	Clivagem de fratura	Fo	Foliação	L	Lineação
				B	Bandamento	DQ	Crista de Ripple	FR	Fratura	Lc	Linha de crista
							Dique				

Área	Ponto	X	Y	Azimuth	Mergulho	Tipo	Classe	Cine1	Cine2	Observação	Azimuth/pi	merg	Setoi	Unidade	Rocha
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	10	80	FR								Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	268	82	FR								Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	94	85	FR								Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	280	85	FR								Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	20	89	FR	R'							Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	109	89	FR	P	Sin						Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	93	86	FR	R							Fm. Ererê	siltitos
Monte Alegre	MA-01	824692	9785206	182	10	L	E	Sin		lineação				Fm. Ererê	siltitos

Os dados estruturais foram tratados em programas de análises estereográficas. Inicialmente utilizou-se o StereoNet© 1992-1995 (*Geological Software, Tromsø, Norway*). A partir das atitudes de fraturas foram gerados diagramas de rosetas com classes de 10° para cada afloramento descrito para posterior correlação com feições lineares de relevo obtidas pela análise de imagem. Esta correlação foi realizada com base na direção do lineamento de relevo identificado com a direção da fratura medida.

Os dados das juntas foram agrupados em diagramas de contornos dos pólos e diagramas de rosetas.

Por definição, neste trabalho as falhas foram assim denominadas, por apresentarem, além do plano de descontinuidade, estrias de atritos e indicadores cinemáticos.

Posteriormente, para calcular os campos de tensão foi utilizado o programa de domínio público (*freeware*) Sigmas, desenvolvido por De Freitas (2005), que permite o cálculo dos campos de tensão a partir de dados de falhas. Estes cálculos têm por base o modelo Mohr-Coulomb, que se refere à indicação

de uma componente de deformação triaxial (σ_1 -tensão máxima, σ_2 -intermediária, e σ_3 -tensão mínima), relacionada ao plano de falha (PRICE & COSGROVE, 1990). Neste, os eixos σ_1 e σ_3 estão inseridos em um plano auxiliar que contém o vetor referente ao movimento (estria) bem como o vetor normal ao plano de falha (pólo do plano de falha).

O eixo σ_1 apresenta um ângulo α , com relação à estria, entre 20° e 40° em fraturas rúpteis (normalmente 30°) para corpos isotrópicos (RAGAN, 1985). O eixo σ_3 posiciona-se a um ângulo β , complementar de α , a partir do mesmo referencial de origem, porém rotacionado em sentido oposto. Já o eixo σ_2 encontra-se contido no plano de falha e posiciona-se de maneira perpendicular ao vetor movimento (Figura 2.2).

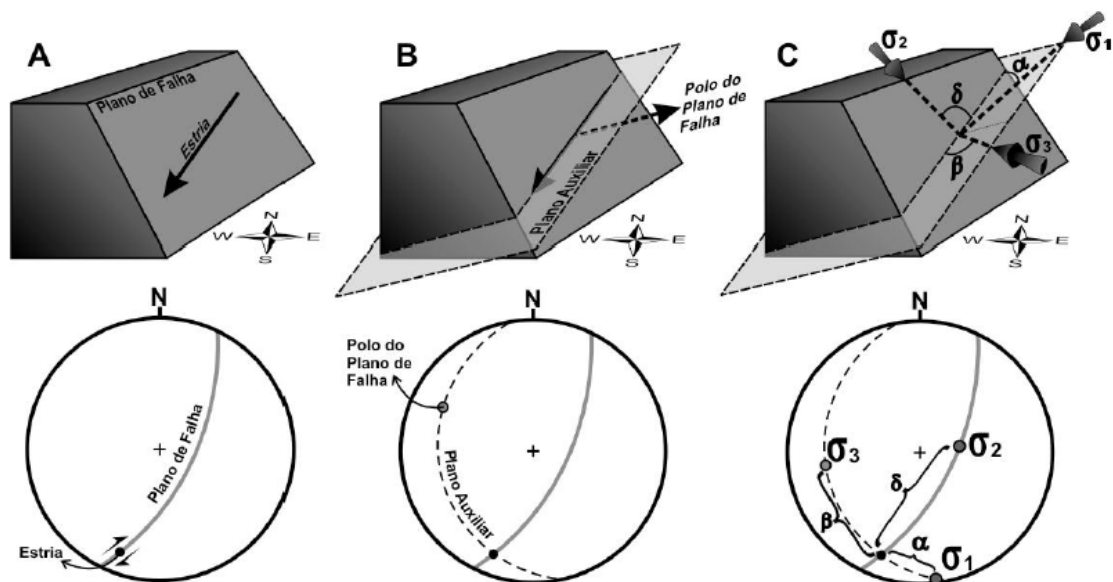


Figura 2.2: Obtenção das tensões pelo critério de Mohr-Colomb. A - Bloco diagrama e visualização ciclográfica do plano de falha e estria indicando o movimento; B - Plano auxiliar que contém σ_1 e σ_3 ; C - Indicação dos tensores e relação angular com a estria. (Fonte: De Freitas, 2005).

No programa Sigmas foram inseridos os dados de planos, estrias de falha e também o sentido de movimento (ou cinemática), se normal, reverso, dextrógiro ou sinistógiro, dos blocos falhados como mostra a Figura 2.3. Este programa não apenas permite calcular a localização dos pontos que representam os campos de tensão, como também projeta estes pontos além do plano de falha e a estria, conforme visto na Figura 2.4. Na falha onde se teve dúvida quanto a cinemática, o dado foi descartado.

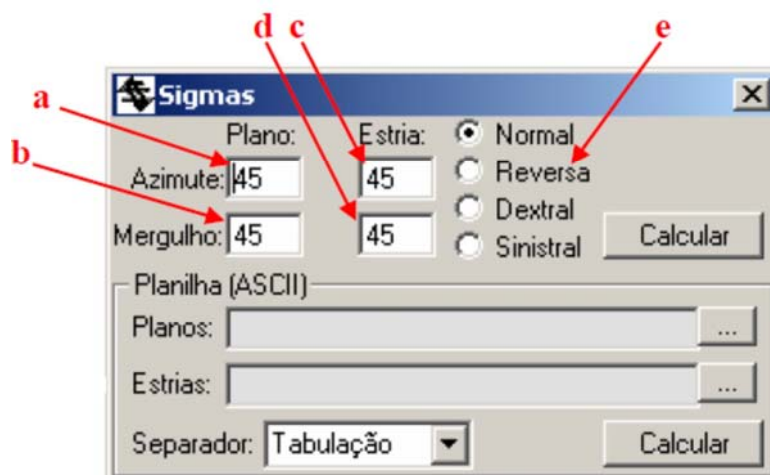


Figura 2.3: Painel de entradas dos dados do programa Sigmas (DE FREITAS, 2005). a) plano da falha; b) mergulho da falha; c) plano da estria; d) mergulho da estria e e) cinemática envolvida.

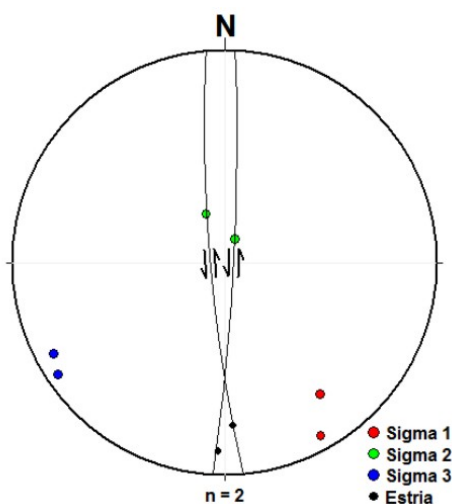


Figura 2.4: Visualização do resultado dos dados processados pelo programa Sigmas (DE FREITAS, 2005).

Neste processo identificou-se o σ_1 , σ_2 e σ_3 , que correspondem, respectivamente, aos campos de maior tensão, de tensão intermediária e consequentemente o de menor tensão.

Para os levantamentos estruturais das feições rúpteis, a análise de paleotensões com base no critério de Mohr-Coulomb apresenta resultados satisfatórios para a determinação de diferentes eventos de deformação, como mostram diversos trabalhos de análise estrutural (RICCOMINI, 1995; STRUGALE, 2002; TRASKOS, 2006; FIGUEIRA *et al.*, 2009). Nestes trabalhos a partir dos campos de tensão medidos, estes foram plotados em diagramas e separado em função da concentração dos pontos.

Os dados das paleotensões foram adicionados à planilha excel (Tabela 2.1) e correlacionados aos dados de fraturas obtidos em campo. Inicialmente todos os pontos foram agrupados em diagramas com os respectivos valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 e depois os tensores foram separados em eventos correlatos. Com base nesta subdivisão foram definidos pelo menos dois eventos registrados nas falhas na região do domo.

De forma complementar, até para verificar se o dado medido pelo Sigmas estava correto, utilizou-se também um segundo programa para as análises estruturais, denominado Win_Tensor. Este programa também é de domínio público e foi desenvolvido por Dr. Damien Delvaux do Departamento de Geologia e Mineralogia do Royal Museum for Central Africa.

O formato de entrada dos dados neste programa difere-se do Sigmas, posto que os dados devem ser representados com os seguintes detalhes: formatos *dip-angle/dip-direction*; *dip-direction/ dip-angle*; *strike (0-180°)/ dip-angle (N, E, S ou W)* e *strike (0-360°)/ dip-angle (dip-dir = strike + 90°)*; estrutura: plano de falha com estria, par conjugado, plano de cisalhamento com fratura de tensão, fratura, acamamento, foliação; tipo da fratura: pluma, junta, veio, dique, compressão com movimento de cisalhamento, plano de acamamento, plano de foliação e desconhecido; nível de confiabilidade: certo, provável, suposto ou desconhecido. Estes dados de entrada podem ser vistos na Figura 2.5.

The screenshot shows the Win_Tensor software interface. The top menu bar includes File, View, Edit, Data, Tools, Graphics, Window, and Help. The main window is divided into several sections:

- Site properties:** Fields for Project, Site ID, Area name (Monte Alegre), Geologist(s), Field date, Incooding date (23/03/2011), Magnetic N, Longitude (E), and Latitude (N).
- Outcrop style:** Fields for Stratigraphy, Lithology, Structure, and Timing.
- Stereonet - Id: 10-4:** Two circular stereonet plots showing fault slip data.
- Data Flow 4 (Id: 10-4) / Definition Type:** A list of data types including Data Value, Data Type, and Data Object.
- Data Parameter:** A list of parameters including Fault plane with slip line (slickenside), Two conjugated shear planes, Shear plane with tension (fracture), Plane alone (Fracture, Bedding, Foliation), Focal mechanism: Movement and auxiliary planes & type, Focal mechanism: P and T kinematic axes, Line alone (Fold or Boudinage axis, Stylolite peak...), and Current direction from bedding and current planes.
- Table of Fault-slip data:** A table with columns for N°, Definition, Fracture plane, Unused, Fract, Cont, Weight, Actv, Striae, Subset, Comments, Fracture plane, Slip line, Slip, Subsets, Fracture plane, Slip line, Slip, Subsets. The table contains 13 rows of data.

Figura 2.5: Página da entrada dos dados do programa Win_Tensor (Dr. Damien Delvaux).

Esta segunda análise teve o objetivo de comparar se os cálculos

realizados pelo Sigmas estavam corretos e o Win_Tensor permitiu, também, calcular as regiões compressivas e distensivas pelo método dos diedros retos de Angelier & Mechler (1977). Esta análise comparativa entre os programas permitiu concluir que ambos os programas apresentam resultados muito semelhantes e coerentes no que se refere ao cálculo dos campos de tensão.

Estes diagramas estão apresentados na Figura 2.6.

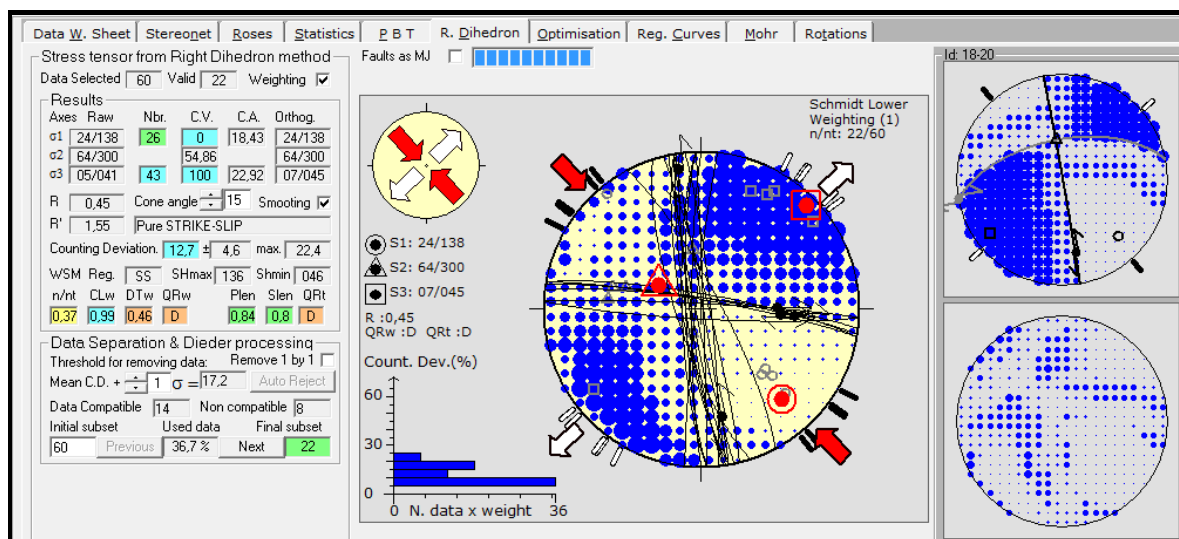


Figura 2.6: Cálculo das regiões compressivas e distensivas pelo método dos diedros retos realizado pelo Win_Tensor.

Uma característica do Win_Tensor é a visualização da direção dos planos por rosetas e também a direção dos mergulhos dos planos de fraturas. As estrias são representadas pela direção dos mergulhos e azimuth como podem ser vistos na Figura 2.7.

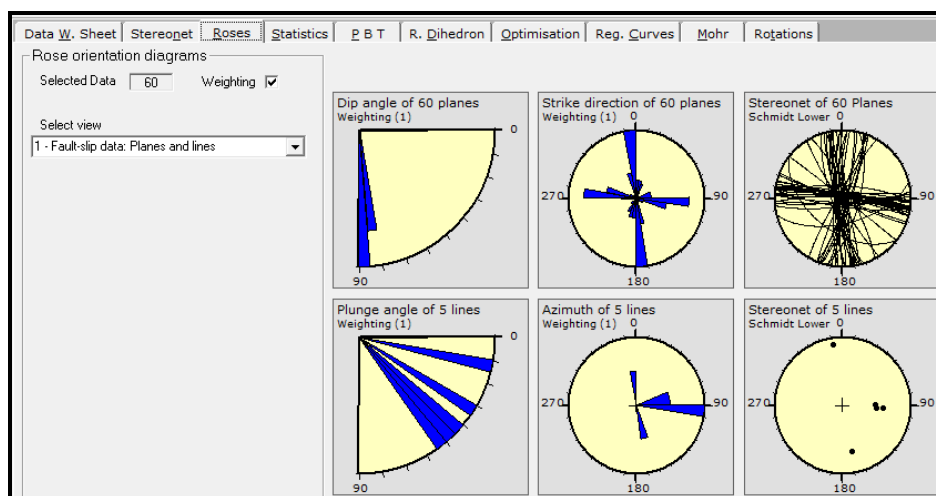


Figura 2.7: Estereogramas dos dados dos planos e estrias realizados pelo Win_Tensor.

A partir dos campos de tensões determinados por ambos os programas, estes foram comparados ao modelo de Riedel (1929). Nesta comparação foi possível observar que em algumas direções de Riedel (R, R', T, P, Y) são correlatas às direções das estruturas observadas, tanto em campo quanto através da análise de imagens. Ainda nesta comparação verificou-se que os indicadores cinemáticos identificados em campo são compatíveis à cinemática do modelo Riedel.

A nomenclatura das falhas baseia-se neste modelo como **R** - fratura de cisalhamento Riedel ou sintética; **R'** - fratura de cisalhamento conjugada, anti-Riedel ou antitética; **T** - fraturas de tensão; **P** - fratura sintética secundária; **X** - fratura antitética secundária; e **Y** - direção principal de cisalhamento, formada pela superfície envoltória das fraturas R e P em estágios mais avançados de deformação.

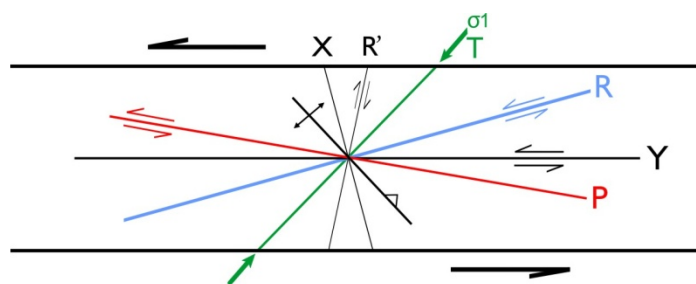


Figura 2.8: Modelo Riedel, (1929) das fraturas teóricas sob cisalhamento simples.

2.4 GEOPROCESSAMENTO

2.4.1 Banco de Dados

Com o intuito de agregar as informações de campo e aquelas oriundas de fontes tais como dados bibliográficos, mapas pré-existent, imagens orbitais e aéreas, procurou-se, em consonância a tendência atual dos estudos em geociências, utilizar ferramentas geotecnológicas de geoprocessamento para integração de diversas bases de dados e também na criação de mapas auxiliares de geoestatística de lineamentos, declividade, extração automatizada da drenagem e outros. Neste caso em específico utilizou-se o programa ArcGis 9.2.

Este programa permitiu a conexão das diversas bases de dados, bem como a criação de mapas temáticos e mapas integrados. Toda base de

informação inserida neste ambiente está georreferenciada a um mesmo sistema de coordenadas geográficas. Neste caso utilizou-se o *datum* SAD-69 com projeção policônica.

O banco de dados conta com arquivos digitais disponibilizados pela CPRM, (2008) na escala (1:1.000.000) com **bases planialtimétricas** (curvas de nível, cotas altimétricas, estrutura viária, limites municipais e localidades); **base hidrográfica** (rios, igarapés e lagoas); **mapa geológico** (unidades litoestratigráficas e informações correlatas - idade, ambiente de sedimentação, sistema de deposição, ambiente tectônico, litotipos, classe e subclasse e levantamento estrutural).

A estrutura deste banco de dados conta ainda com imagens obtidas através do *Google Earth* (Figura 2.9), modelos SRTM (NASA – 90 m), imagens Landsat 7 ETM+, fotografias aéreas e informações provenientes de referências bibliográficas.

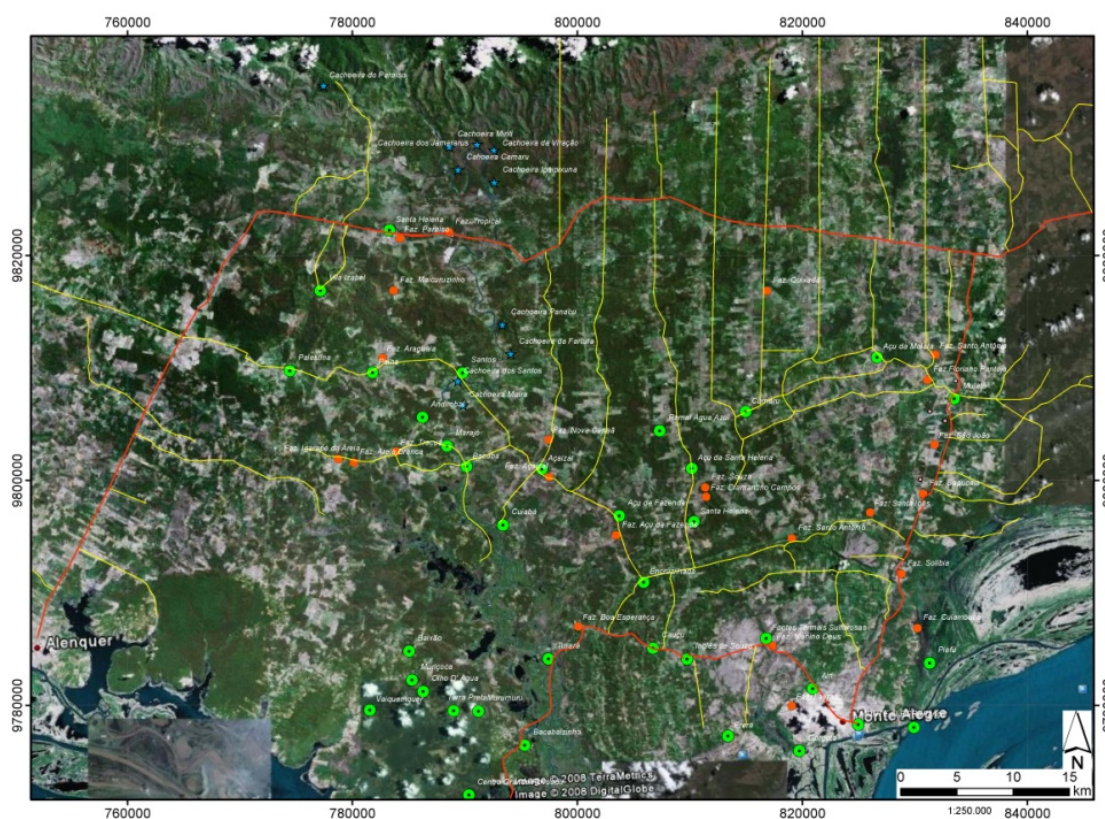


Figura 2.9: Exemplo da integração de diversas bases de dados: Imagem Spot obtida no “*Google Earth*” com sobreposição da rede viária e localidades (CPRM, 2008).

Os pontos de campo foram inseridos no banco de dados, por meio do seu

posicionamento geográfico, obtido por GPS de navegação, e a estes foram atribuídas informações como numeração, litotipo e unidade litoestratigráfica pertencente. Estes dados facilitaram buscas cruzadas, tais como a listagem de pontos somente de uma determinada formação geológica com os diferentes litotipos mapeados.

A manipulação destes dados permitiu, conforme já mencionado, integrar diferentes níveis de informação com a geração de mapas temáticos que foram fundamentais para o entendimento da análise morfoestrutural. Estes mapas serviram também para o reconhecimento geomorfológico / geológico e identificação de anomalias de drenagem e *trends* estruturais.

2.4.2 Análise de Imagens

A análise de imagens foi de extrema importância neste trabalho, pois permitiu análises multi-escala, fornecendo elementos para a individualização das grandes estruturas (lineamentos), quebras de relevo, drenagens e outros. Estas observações foram realizadas desde uma escala regional, a partir de imagens orbitais (1:800.000 e 1:200.000), até a escala de detalhe, com fotografias aéreas (1:8.000) que, posteriormente, foram acrescidas aos dados obtidos em campo.

A escala 1:800.000 foi definida neste trabalho por apresentar uma resolução adequada para interpretação dos lineamentos em escala regional. Na escala 1:200.000 o mesmo traço sutilmente ajustado para a posição correta.

Esta abordagem permitiu a integração entre as informações litoestratigráficas e estruturais identificadas nos pontos descritos, em campo, com feições regionais impressas no relevo.

A análise de dados oriundos de sensores remotos foi realizada com o objetivo de identificar as grandes estruturas regionais presentes na área e possíveis relações espaciais e temporais entre as discontinuidades impressas no relevo, definindo assim os padrões geométricos da deformação do Domo de Monte Alegre.

Neste contexto as fotografias aéreas foram interpretadas por estereoscopia, os lineamentos foram vetorizados e esta escala de detalhe permitiu a identificação de direções não observadas nas escalas regionais.

2.4.2.1 SRTM

Dos modelos de radar disponíveis em domínio público, foram utilizados modelos SRTM 90 m obtidos a partir dos sites da USGS (<http://seamless.usgs.gov/>), CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) e Embrapa m(<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>). Os modelos da Embrapa serviram de base para a geração de traços de drenagem, inseridos no item “Drenagem Teórica”, que será visto mais adiante.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) é um projeto de parceria entre a NASA e a NGA (*National Geoespatial – Intelligence Agency*), realizado com objetivo de gerar um mapa topográfico digital da superfície da Terra nas três dimensões. Dos produtos disponibilizados pela USGS o modelo GTOPO 30, apresenta resolução de 1 km, onde se visualiza melhor as estruturas regionais. O modelo SRTM 90 é considerado, entre outros modelos também de domínio público, o que oferece a mais alta resolução: 90 metros.

Por meio das ferramentas de geoprocessamento foi realizado o preenchimento de pontos sem dados “bugs” através da ferramenta *fill* e especificamente nas ferramentas “*hillshade*” do “*spatial analyst*” (Arc Map 9.2) foram gerados modelos de relevo (SRTM), com pseudo-iluminação nos quadrantes 45NE, 45 NW, N-S e E-W para que fossem destacadas as feições morfoestruturais em todas essas direções. A Figura 2.10 mostra a imagem SRTM com iluminação Norte e a área com essa delimitação permitiu a análise regional.

Como já mencionado anteriormente, no modelo de relevo foram iniciadas as interpretações dos lineamentos de relevo com enfoque em diferentes escalas. Na escala regional (1:800.000) foram traçados os lineamentos positivos e negativos, que correspondem respectivamente aos alinhamentos das cristas e vales e na escala (1:200.000) foi feito um pequeno ajuste destes, já que esta escala oferece maior precisão. Este ajuste não altera o dado, apenas aumenta a precisão do mesmo. Nesta escala ainda foram traçados os lineamentos não observados na escala regional.

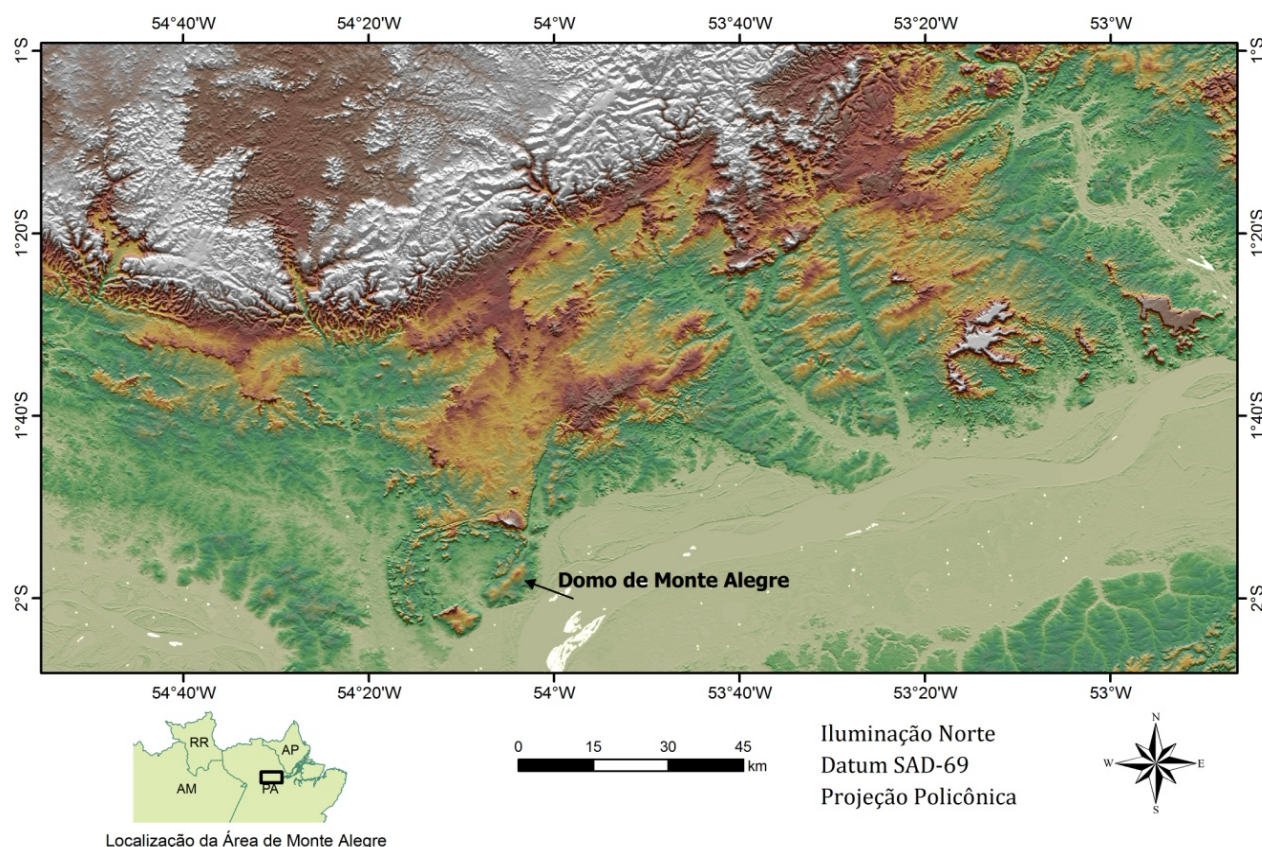


Figura 2.10: Modelo SRTM 90m, com iluminação Norte, da região estudada.

2.4.2.2 Landsat

As imagens Landsat 7 ETM+ utilizadas neste estudo e que abrangem a área apresentada na Figura 2.10, correspondem a parte das cenas 227/61, 226/61 e 228/61 que foram interpretadas em combinação falsa cor (RGB 5,4,3) conforme apresenta a Figura 2.11. Para trabalhar com estas imagens foi utilizado o programa Geomática – Focus, versão 8.2 (Copyright 2001 PCI Geomatics). Inicialmente fez-se a fusão das 8 bandas para que fosse possível a combinação entre elas que resultou em um único arquivo com extensão (.pix). Estes processos foram importantes para as análises subsequentes e enriqueceram a pesquisa ora apresentada, pois incorporam, também, técnicas de sensoriamento remoto, como as descritas acima.

Devido à presença de áreas recobertas por nuvens decidiu-se, na análise regional, utilizar as informações do modelo SRTM (1:800.000).

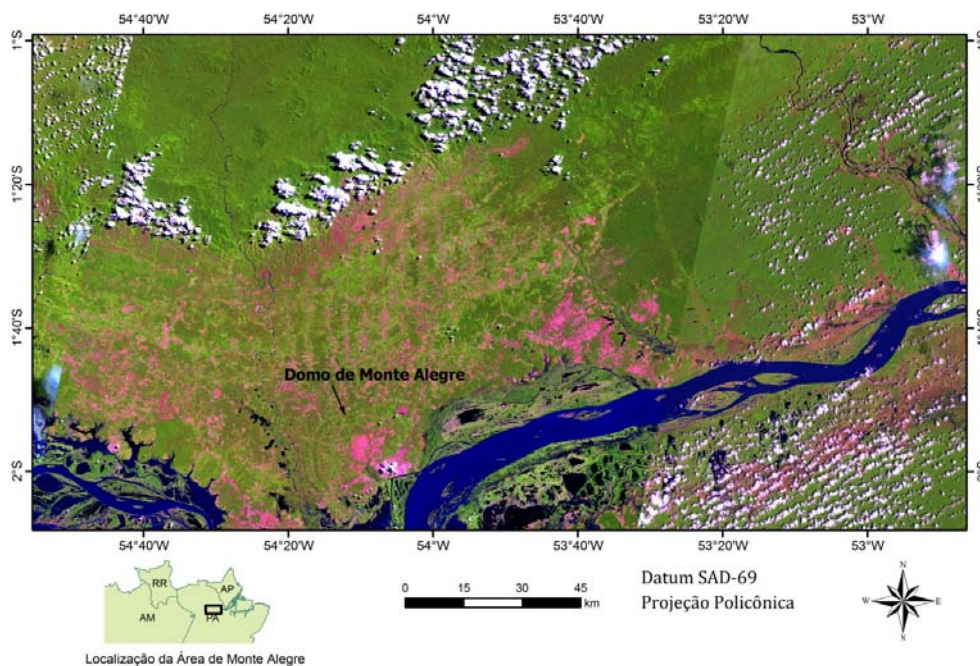


Figura 2.11: Imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cenas 227/61, 226/61 e 228/61, RGB (5,4,3).

2.4.2.3 Fotos Aéreas

As fotografias aéreas utilizadas fazem parte do acervo da biblioteca da CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Das fotografias disponíveis deste acervo, foram escolhidas, para o detalhamento nesta etapa, apenas as que compreendem a área do Domo de Monte Alegre, que totalizam 76 fotos aéreas.

As fotos foram organizadas, com seu devido recobrimento e, para facilitar sua localização, as faixas foram nomeadas em ordem alfabética com início no sul e término na borda norte da estrutura e igualmente numeradas do leste para o oeste, conforme apresenta a Figura 2.12.

Uma vez concluída a fase de organização das fotos, iniciou-se sua interpretação. Esta interpretação seguiu os mesmos parâmetros do SRTM, ou seja, lineamentos positivos (cristas) e negativos (vales). Os pares estereográficos foram interpretados com estereoscópio de espelho e, nesta fase, procurou-se reconhecer os seguintes elementos fotogeológicos: alinhamentos de relevo (positivos e negativos), lineações de relevo (positivas e negativas), rupturas de declividade associadas a contatos litológicos (quebras de relevo positivas e negativas), indicações de mergulhos de camadas e alinhamentos e escarpas alinhadas (escarpas de falha).

Após a conclusão desta fase, cada fotografia e sua respectiva

interpretação, foi escaneada e georreferenciada segundo o sistema de coordenadas adotado na pesquisa. As fotos foram individualmente georreferenciadas com base em dados planimétricos da base cartográfica CPRM, 2008. A área interpretada pela foto aérea é menor que a interpretada pelo modelo SRTM em função da obtenção das fotos apenas nesta região e também que o foco do detalhe ateuve-se apenas no domo.

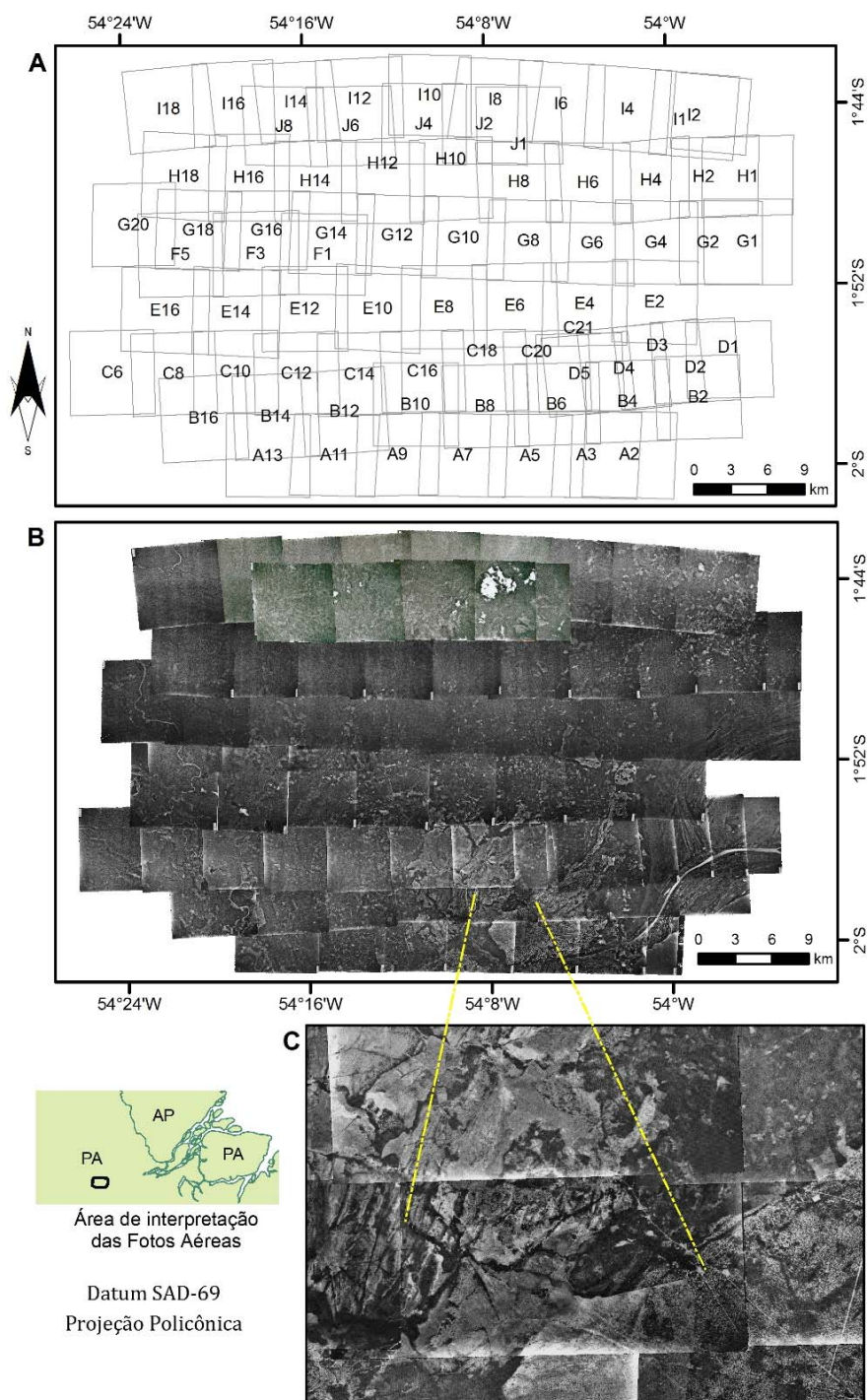


Figura 2.12: Fotos aéreas escala (1:8.000): A) Articulação das fotos aéreas utilizadas; B) Fotos aéreas adquiridas no acervo do CPRM; C) Detalhe da resolução da foto aérea. A área compreendida pelas fotos é apenas a região do Domo de Monte Alegre.

2.4.3 Mapas Temáticos

2.4.3.1 Lineamentos

O termo lineamento (O'LEARY *et al.*, 1976) refere-se a uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere das feições adjacentes e refletem fenômenos da subsuperfície.

De acordo com estas premissas, neste trabalho atribuiu-se às feições lineares de relevo a denominação de lineamentos, elementos com conotação estrutural, ou seja, feições naturais na superfície do terreno, disposta de forma alinhada ou suavemente curva, que refletem discontinuidades estruturais em subsuperfície.

Os lineamentos foram extraídos a partir da interpretação de imagens orbitais e aéreas e representam o principal conjunto de morfoestruturas. São compostos por diversas direções estruturais, representadas por lineações negativas e positivas, que correspondem aos vales alinhados e cristas, respectivamente. Nestas imagens, foram traçadas também informações das escarpas de falhas e camadas basculadas encontradas.

Para cada base interpretada, (SRTM e fotos aéreas), foram elaborados diagramas de rosetas por comprimento e frequência dos lineamentos em intervalos de 10°.

Nesta abordagem foram analisadas a continuidade, a persistência e a presença de feições indicativas de movimentação nos feixes de lineamentos e a relação com as unidades litoestratigráficas.

O produto final resultou em mapas quantitativos da frequência e comprimento, por intermédio da representação em mapas de contorno de isovalores. O programa (*LinAnalyst* v. beta1), desenvolvido por De Freitas (2005), permitiu a geração destes mapas de contorno a partir de métodos de contagem denominados modelos analíticos. Nos mapas analisados, entre os métodos desenvolvidos, o que teve melhor resultado foi o método de grade.

Pelo método de grade, segundo De Freitas (2005), a contagem é executada a partir da presença do lineamento. Independente da parte inserida na célula analisada a presença da estrutura acrescenta uma unidade à frequência de

lineamentos. Além da frequência, neste método também são computados o comprimento e total dos lineamentos que interceptam a célula (Figura 2.13).

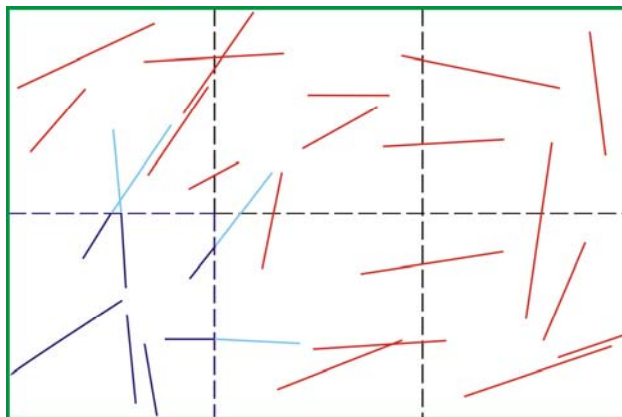


Figura 2.13: Método de análise dos lineamentos por grade, no programa LinAnalyst (De Freitas, 2005).

2.4.3.2 Análise morfoestrutural com base em drenagens

A partir dos dados de elevação obtidos no modelo de terreno SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e utilizando-se técnicas de Sistema de Informação Geográficas (SIG), no programa ArcMap 9.2, por meio de ferramentas específicas do “*spatial analyst*”, referentes à hidrologia, foi possível extrair, de forma automática, a rede de drenagem da área de estudo. Como a rede de drenagem foi obtida por estas ferramentas e não pelo método convencional (fotointerpretação) a esta drenagem denominou-se drenagem teórica. Estes resultados acrescentaram um ganho significativo na interpretação das imagens e suas estruturas a partir das características das drenagens, principalmente se comparada aos mapas cartográficos pré-existentes.

Para esta extração automatizada da drenagem, foram testados os três modelos digitais de terreno (SRTM's - NASA, CGIAR e Embrapa). Dentre estes, o que apresentou melhor resposta no que se refere a continuidade e regularidade nos traços das drenagens foi o modelo da Embrapa.

Os passos para o cálculo e extração da drenagem teórica consistiram no uso sequencial de ferramentas do programa mencionado acima, apresentados por Figueira *et al.* (2008), conforme pode ser visualizado na Figura 2.14.

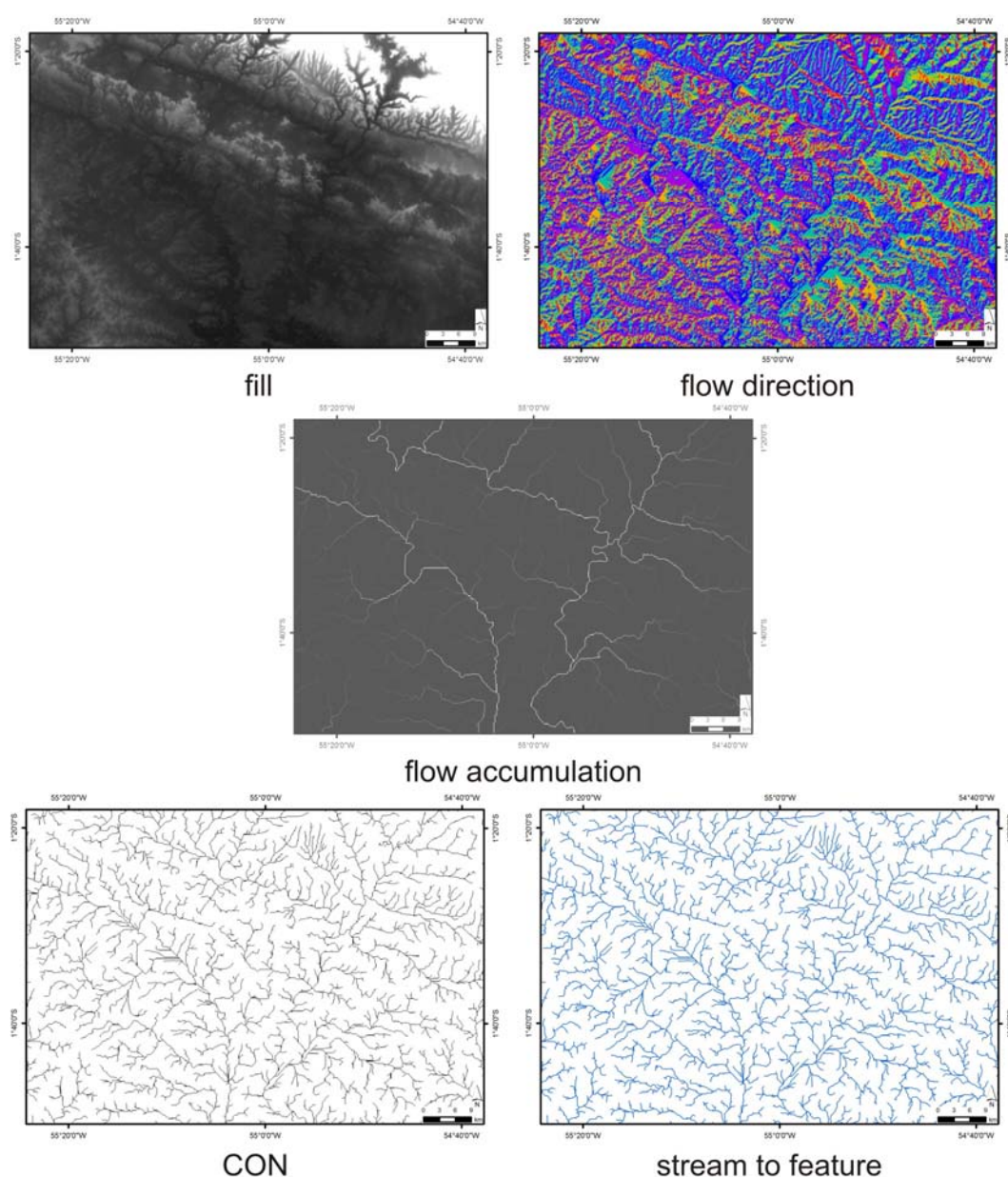


Figura 2.14: Exemplo das etapas da aplicação das ferramentas utilizadas para o cálculo da drenagem teórica a partir de uma região escolhida aleatoriamente do modelo SRTM 90m. Sem escala.

De acordo com a Figura 2.14, destaca-se que o “*fill*” é um filtro que remove imperfeições no dado atribuindo valores estatísticos na superfície; “*flow direction*” calcula a direção do fluxo com base na declividade do terreno; “*flow accumulation*” cria a imagem da acumulação do fluxo para cada célula; “*con*” é uma condicional que controla o nível de adensamento do dado e por fim “*stream to feature*” cria o arquivo *shapefile* do vetor da drenagem.

A área selecionada para esta etapa compreende uma área maior do que a abordada até então, com enfoque regional, na determinação de anomalias de

drenagem, entendimento da dinâmica das falhas e correlação com trabalhos anteriores.

As drenagens atuais estão na sua maioria condicionadas ao controle tectônico e é com este enfoque que foi realizada a identificação das anomalias. Parte-se do princípio que feições típicas identificáveis no relevo, tais como capturas de drenagens, deslocamentos, presença de escarpas, alinhamentos de vales e etc., e podem corresponder a soerguimentos e rebaixamentos no terreno provocados por movimentos tectônicos (SUMMERFIELD, 1993).

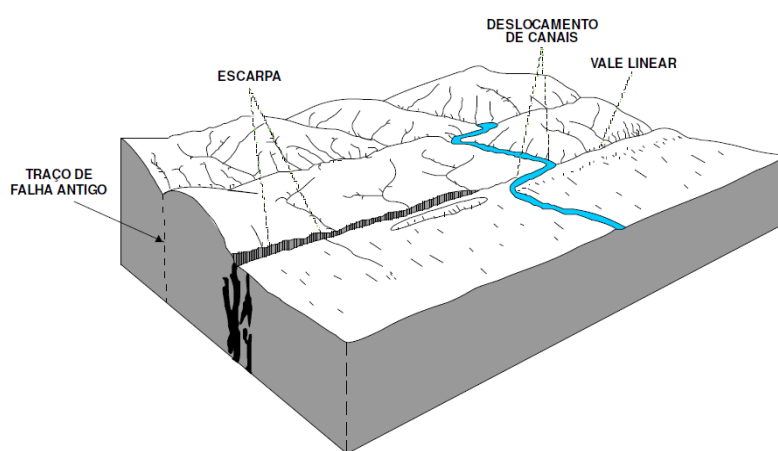


Figura 2.15: Feições de relevo associadas ao regime transcorrente (SUMMERFIELD, 1993).

O reconhecimento das formas anômalas da rede de drenagem e dos seus arranjos formados pelos diversos padrões também são de fundamental importância no auxílio às interpretações morfoestruturais. Mattos *et al.* (1982) definem o termo “morfoestruturas” como produto da interpretação de informações obtidas a partir do relevo e drenagem. Desta forma, seguindo este conceito, conforme mencionado, foram extraídas as drenagens de forma automatizada (drenagem teórica) a partir dos modelos SRTM, a partir dos quais procurou-se reconhecer e traçar os padrões de drenagem anômalos com base na assimetria e tropia destas, para assim, permitir visualizar a conformação estrutural da área, como altos e baixos topográficos.

O termo drenagem é definido como sendo uma feição de relevo linear negativa produzida pelo escoamento da água que modela a topografia de uma região (GUERRA, 1993). Segundo Lima (2002), apresenta inúmeros sinônimos, tais como: rio, ribeirão, regato, igarapé, arroio ou riacho, dentre outros. Na região

amazônica a drenagem secundária é chamada de “*igarapé*” que segundo a língua tupi é traduzida por “caminho de canoa”.

Deffontaines & Chirwics, (1991) relacionam padrão de drenagem aos fatores morfológicos que os influenciam, dividindo em três conjuntos: internos, externos e compostos. Os fatores internos estão relacionados ao controle litológico e condição estrutural (mergulho e direção de camadas, falhas, juntas, foliações etc.), os externos dizem respeito, por exemplo, ao clima e o tipo de solo e os compostos resultam da combinação dos fatores anteriores, tais como: topografia, variação do nível eustático, fatores hidrológicos e feições palimpséticas (controle exercido por drenagens antigas).

Os principais padrões de drenagem, segundo Guerra, (1993) são: dendrítico, paralelo, treliça, retangular, anelar, radial centrípeto e radial centrífugo conforme a Figura 2.16.

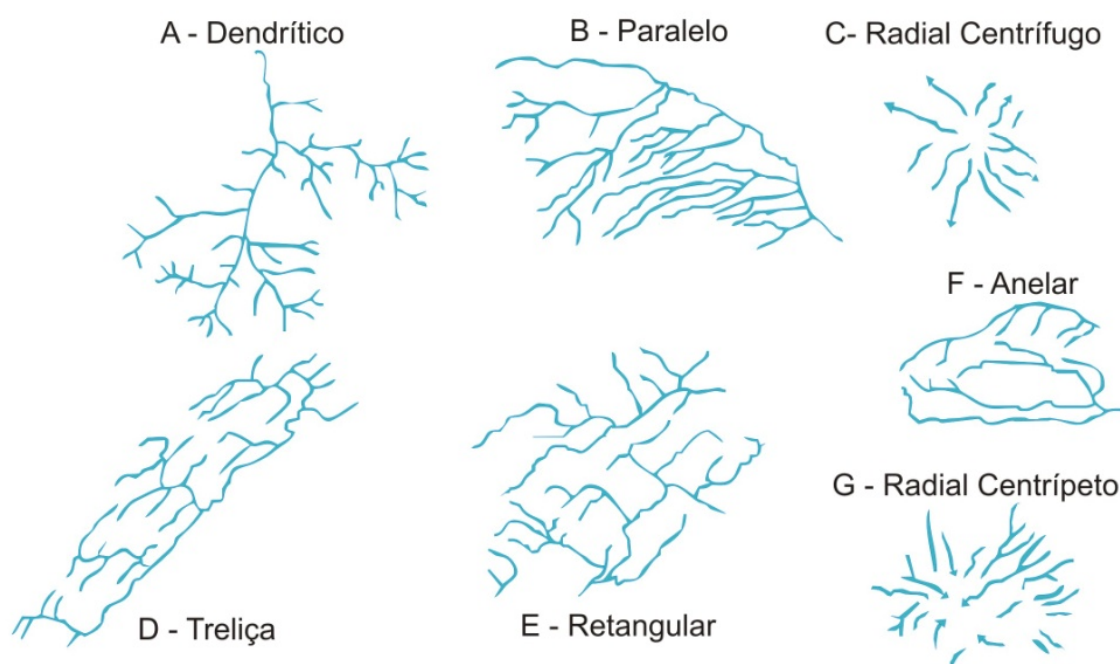


Figura 2.16: Apresentação dos padrões básicos de drenagem. Guerra, (1993).

No processo de reconhecimento dos padrões de drenagem, o principal enfoque, foi na identificação de estruturas anelares e radiais (Figura 2.17). O padrão radial centrípeto ocorre quando a drenagem flui para uma depressão (convergente), ao passo que o centrífugo mostra-se presente quando existe uma

feição positiva (divergente). Já o padrão anelar se caracteriza pela geometria circular de suas drenagens, composta por anéis e está intimamente relacionada com padrão de drenagem radial a exemplo do domo.

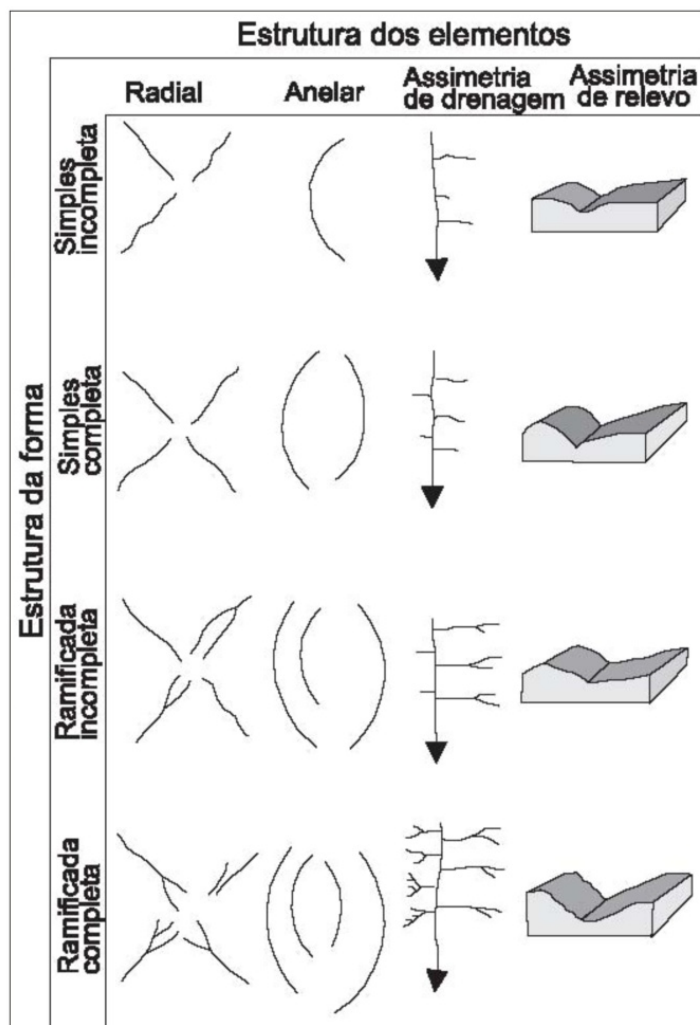


Figura 2.17: Classificação das formas anômalas de drenagem modificado de Soares *et al.*, (1982).

2.4.3.3 Declividade

O mapa de declividade foi gerado a partir de ferramenta (*slope*) do ArcMap. O método usado foi em porcentagem onde se evidencia a conformação dômica da região (Figura 2.18) cujos maiores valores da declividade, representados por cores vermelhas, encontram-se nas bordas do domo, também com distribuição circular.

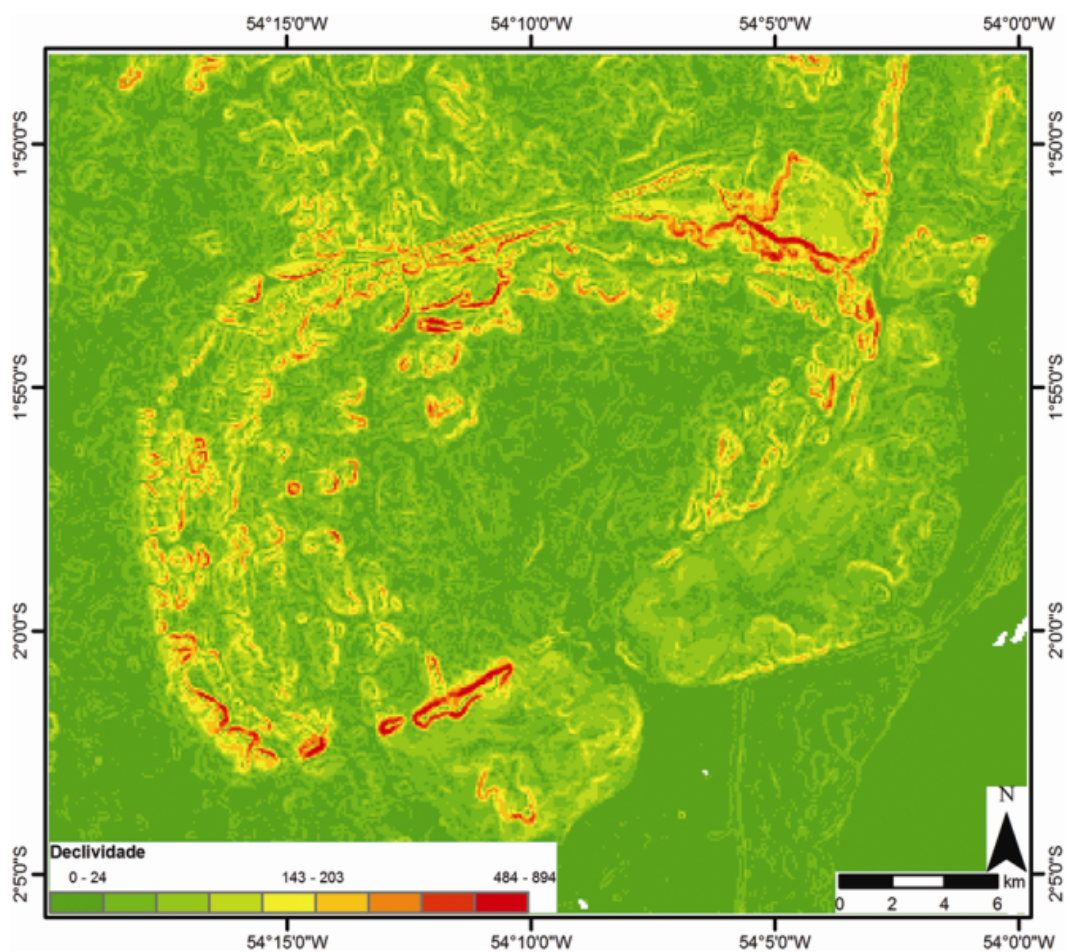


Figura 2.18: Mapa de declividade em porcentagem do Domo de Monte Alegre. A escala gráfica de cores apresenta valores que vão de verde (declividade baixa), para amarelo/laranja (declividade média) e vermelho (declividade alta).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Neste capítulo, pretende-se inicialmente expor o contexto geológico / geotectônico regional, baseado, sobretudo, em informações bibliográficas disponíveis.

3.1 GEOLOGIA E GEOTECTÔNICA REGIONAL

Vasquez *et al.* (2008) subdivide a parte norte do estado do Pará em domínios geotectônicos denominados Domínio Erepecuru-Trombetas (Leste), Erepecuru-Trombetas, Carecuru, Bacia do Amazonas e Bloco Amapá, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

Na região de Monte Alegre, situada na margem norte do rio Amazonas, afloram rochas do Escudo das Guianas que corresponde aos domínios geotectônicos Erepecuru-Trombetas com idades proterozóicas e arqueanas e a Bacia do Amazonas fanerozóica como (Figura 3.2).

As rochas consideradas do embasamento seriam mais abundantes na parte leste do Domínio Erepecuru-Trombetas e foram subdivididas em sequências do tipo *greenstone* e na associação de granitos, gnaisses e migmatitos. Segundo Vasquez *et al.*, (2008), estes dois conjuntos de rochas seriam, provavelmente, a extensão para oeste das rochas da Província Transamazônica (SANTOS *et al.*, 2000) ou do bloco Amapá.

Segundo o mapeamento realizado pelo CPRM (2008), no domínio Erepecuru-Trombetas, as rochas ígneas e metamórficas são de idade arqueana, compreendem granitóides, gnaisses, migmatitos do Complexo Guianense. Já as rochas proterozóicas de origem ígnea, são representadas por gabros da unidade Rochas Máficas Indiferenciadas e rochas alcalinas da Suíte Intrusiva Mapuera, com litotipos classificados como sienogranito e monzogranitos.

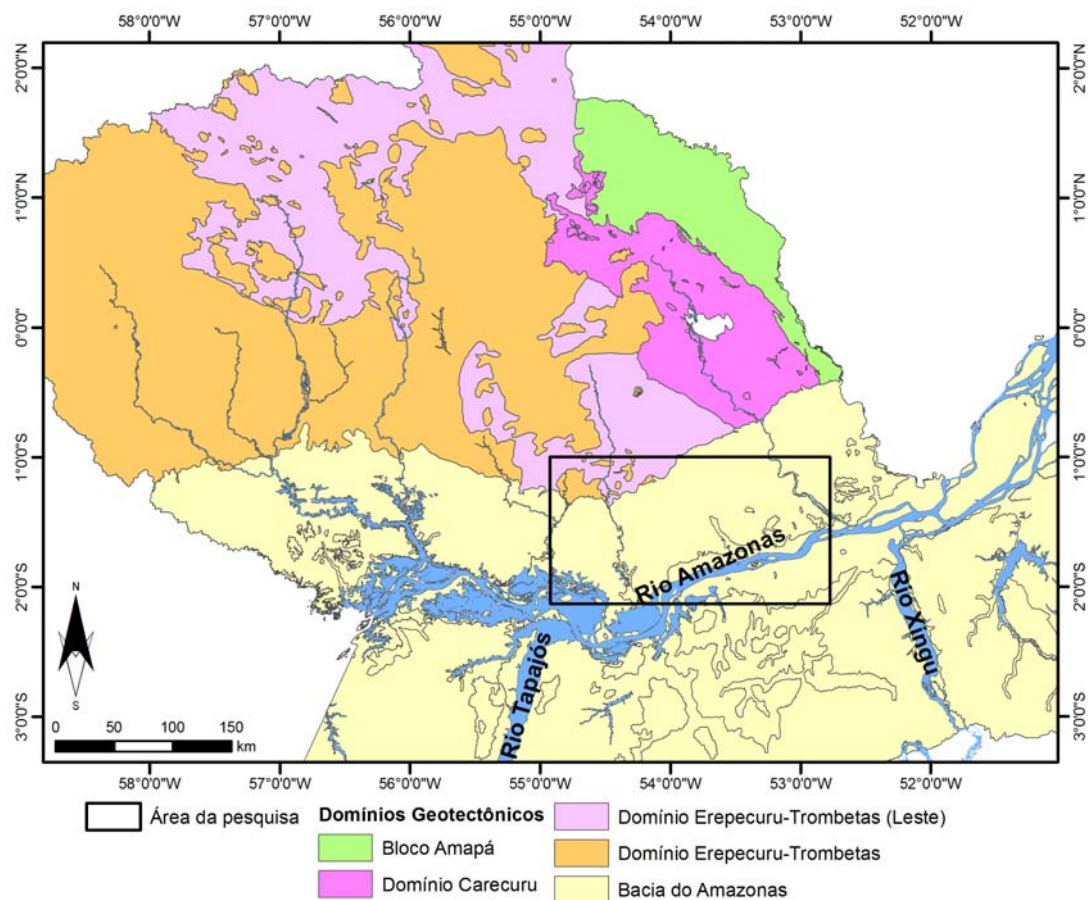


Figura 3.1: Domínios Geotectônicos propostos por Vasquez *et al.*, (2008). A área de pesquisa é representada pelos domínios Bacia do Amazonas, Erepecuru-Trombetas e Erepecuru-Trombetas (Leste).

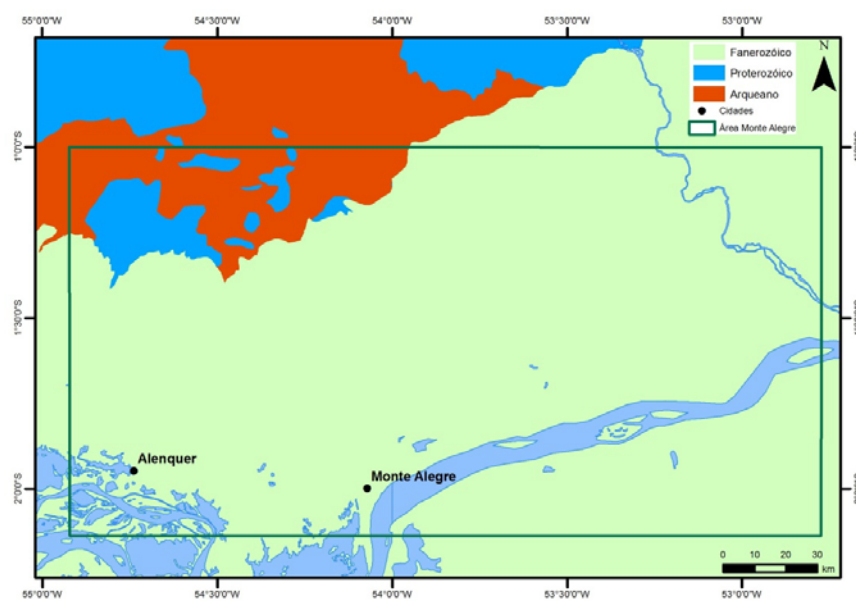


Figura 3.2: Distribuição da exposição de rochas com idades fanerozóicas, proterozóicas e arqueanas. Modificado de Vasquez *et al.* (2008).

3.1.1 Domínio Erepecuru-Trombetas

A região que compreende o Domínio Erepecuru-Trombetas, conforme sugerido por Vasquez *et al.* (2008), não é totalmente conhecida geologicamente. Este domínio representa a porção setentrional da Província Amazônia Central e foi dividido em dois subdomínios, leste e oeste.

No subdomínio leste predominam rochas do embasamento, representadas por associação granito-gnáissico-migmatítica e Greenstone Belts, ambos com idades arqueanas/paleoproterozóicas.

Já no subdomínio oeste dominam associações vulcano-plutônica intracontinental constituídas por rochas vulcânicas félsicas intracontinentais e Suítes Plutônicas Alcalinas Intracontinentais arqueanas/paleoproterozóicas.

As rochas que afloram na porção N-NW da área de influência indireta da área estudada (Figura 3.3) e são pertencentes ao Complexo Guianense, Suite Intrusiva Mapuera e Grupo Irocoumé (CPRM, 2008).

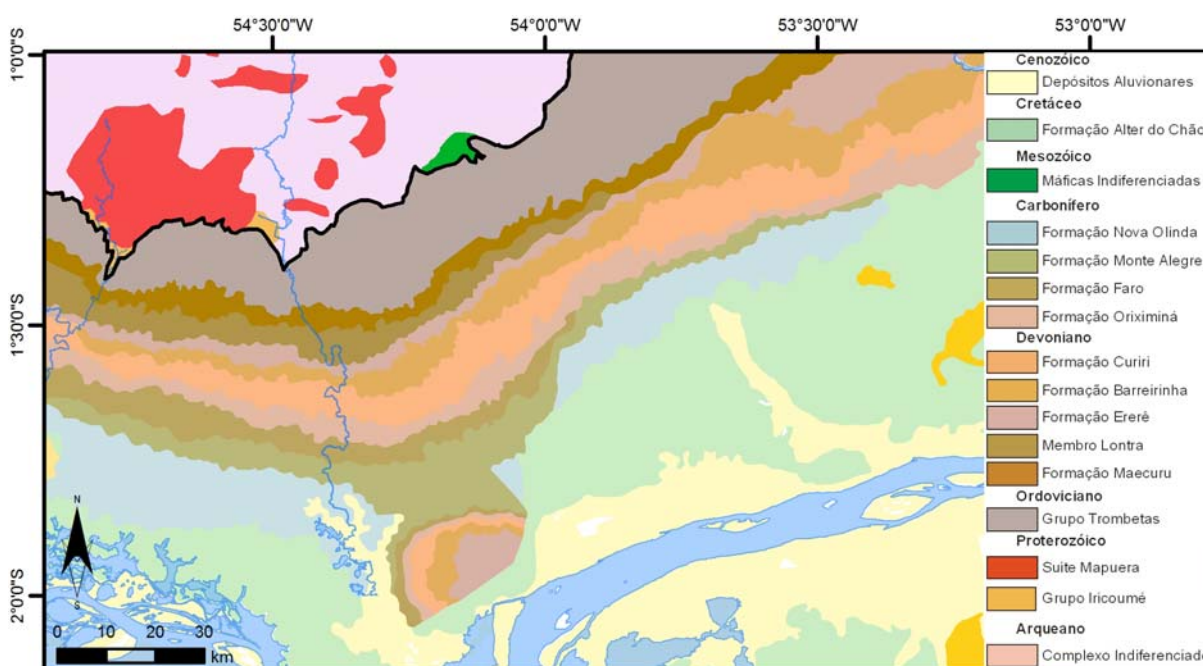


Figura 3.3: Mapa Geológico da região estudada. Ao norte ocorrem rochas proterozóicas e arqueanas representativas do Domínio Erepecuru-Trombetas.

As rochas do Complexo Guianense compreendem o conjunto litológico mais antigo identificado na região, de idade arqueana, onde predomina rochas metamórficas do fácies anfibolito, atingindo localmente, o fácies granulito. Das rochas encontradas destacam-se gnaisses de composição predominantemente

granodiorítica a granítica e subordinadamente kinzingitos, granitóides, granulito, migmatito e ortoanfibolito (CPRM, 2008).

Segundo os dados do projeto RADAMBRASIL (ARAUJO *et al.*, 1976) o Granito Mapuera representa uma fase plutônica do magmatismo plutono-vulcânico instalado sob um regime tectônico distensivo do Proterozóico, que formou corpos de dimensões batolíticas, intrudidos nas rochas arqueanas.

As rochas proterozóicas do Grupo Irocoumé compreendem litotipos como andesito, dacito, riolito, riodacito, e traquito. Essas rochas estão relacionadas, provavelmente, à fase final do regime distensivo com a ocorrência de um magmatismo de natureza mais alcalina representada por corpos intrusivos.

3.1.2 Bacia do Amazonas

A Bacia do Amazonas ocupa parte dos estados do Pará e Amazonas e compreende uma área de aproximadamente 500.000 km², sendo bordejada pelos escudos das Guianas, ao Norte, e Brasileiro, ao Sul (CUNHA *et al.*, 1994; COSTA & HASUI, 1997; MILANI & ZALÁN, 1999; MILANI & THOMAZ FILHO, 2000).

A Bacia do Amazonas foi estratigraficamente separada por Cunha *et al.* (1994), em quatro sequências separadas por discordâncias: 1) Sequência Ordoviciano-Devoniana, que reúne os sedimentos clásticos marinhos do Grupo Trombetas, está parcialmente truncada pela discordância decorrente da Orogenia Caledoniana; 2) Sequência Devoniana-Carbonífera, que corresponde aos clásticos flúvio-deltáicos e neríticos dos grupos Urupadi e Curuá, tem seu topo marcado pela discordância relacionada à Orogenia Eo-Herciniana; 3) Sequência Permo-Carbonífera, formada pelos clásticos, carbonatos e evaporitos continentais, de ambiente marinho restrito do Grupo Tapajós, está profundamente cortada pela discordância resultante da Orogenia Gondwanide (ZALÁN, 1991) e do Diastrofismo Juruá e, finalmente, 4) Sequência Cretáceo-Terciária que é composta pelos clásticos flúvio-lacustres do Grupo Javari, ocupou os espaços criados pela atividade da Orogenia Andina.

A carta estratigráfica adotada no presente trabalho (CUNHA *et al.*, 1994) representa o arcabouço utilizado na comunidade geológica, embora existam divergências quanto ao posicionamento e idade de alguns intervalos (Figura 3.4).

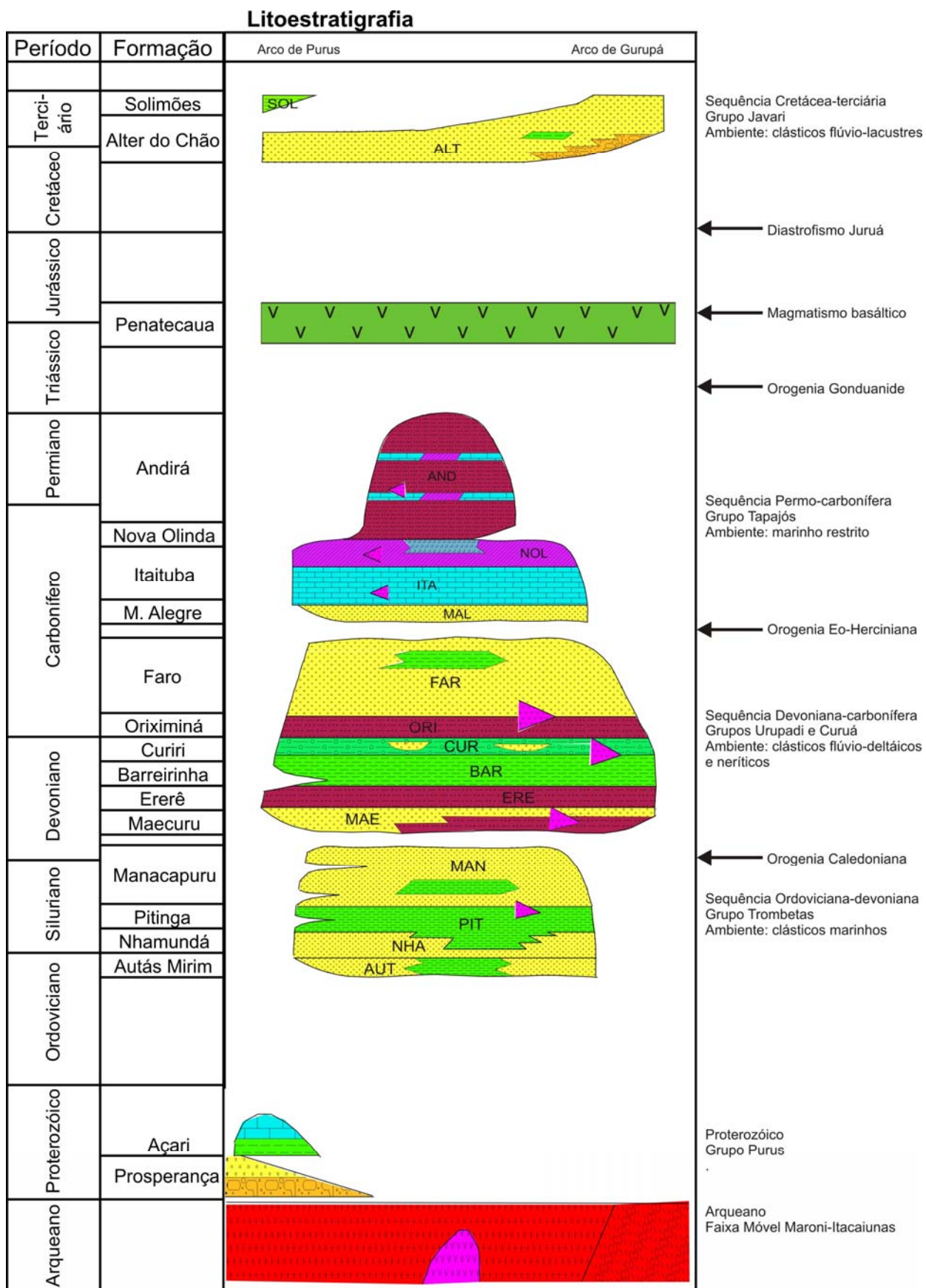


Figura 3.4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas e embasamento. Modificado de Cunha *et al.* (1994).

3.1.2.1 Sequência Ordoviciano-devoniana

3.1.2.1.1 Grupo Trombetas

Inicialmente Derby (1878) denominou os arenitos e folhelhos na Cachoeira Vira Mundo, no rio Trombetas de “Série Trombetas”. O estágio inicial da deposição da bacia, segundo Cunha *et al.* (1994) teve caráter pulsante, com alternância de depósitos glaciais e marinhos. A sequência basal é constituída pelo Grupo Trombetas, dividido por Caputo *et al.* (1971) em formações Autás Mirim, Nhamundá, Pitinga e Manacapuru.

Formação Autás-Mirim

Nomeada inicialmente como membro por Caputo *et al.* (1971, 1972), esta formação é datada do Ordoviciano Superior. Corresponde à unidade litoestratigráfica basal do Grupo Trombetas, sendo registrada a ocorrência de arenitos e folhelhos típicos de ambiente nerítico (CUNHA *et al.*, 1994).

Formação Nhamundá

Corresponde à primeira unidade litoestratigráfica do Período Siluriano. Conforme Cunha *et al.*, (1994), é composta por arenitos neríticos e depósitos glaciogênicos. Segundo Grahn & Melo (1990) e Grahn, (2005), os arenitos suprajacentes da Formação Nhamundá são desprovidos de microfósseis, mas intercalações de folhelhos em sua seção superior contêm quitinozoários da mesma idade do membro inferior da Formação Pitinga. Desta forma, os arenitos da Formação Nhamundá estão dispostos lateralmente aos folhelhos da Formação Pitinga.

Formação Pitinga

Inicialmente esta unidade foi denominada “Membro Pitinga” por Breitbach (1957) que corresponde à seção de folhelhos e silexitos intercalados. É composta por folhelhos, arenitos muito finos neríticos e diamictitos marinhos (CUNHA *et al.*, 1994). O contato abrupto entre a Formação Pitinga e Nhamundá, é interpretada por Nogueira *et al.* (1999), como importante marco estratigráfico no Grupo Trombetas, identificado na região de Presidente Figueiredo.

Formação Manacapuru

Situa-se no topo do Grupo Trombetas e divide-se entre o Neo-Siluriano e Eo-Devoniano (CUNHA *et al.*, 1994). Arenitos e pelitos neríticos e litorâneos determinam as litologias predominantes na formação. Levantamentos realizados

por Oliveira & Lima (1990) na região da Cachoeira do Viramundo, caracterizam as rochas como arenitos com matriz argilosa, de cor cinza e ocorrência de níveis sílticos. São ocorrentes camadas sideríticas na base e topo da unidade, que encontram-se associadas aos arenitos.

3.1.2.2 Sequência Devoniana-carbonífera

Após a Orogenia Eo-Herciniana iniciou-se a intercalação de depósitos típicos de ambientes neríticos e flúvio-deltaicos do Grupo Urupadi, que passaram aos depósitos do Grupo Curuá, típicos de ambiente de mar anóxico da Formação Barreirinha, unidade geradora de hidrocarbonetos da bacia, a glácio-marinho entre o meso e neo-Devoniano (CUNHA *et al.*, 1994).

No Início do Carbonífero inicia-se a deposição em ambiente deltaico-nerítico da Formação Oriximiná que passa a flúvio-deltaico. Este ciclo termina com a Orogenia Caledoniana.

3.1.2.2.1 Grupo Urupadi

Este grupo abrange o intervalo Eodevoniano ao Mesodevoniano e é constituído por duas formações Maecuru e Ererê (CUNHA *et al.*, 1994).

Formação Maecuru

Unidade correspondente à base do Grupo Urupadi, ocupa posição no registro estratigráfico entre o Emsiano e Eifeliano. Scheffler *et al.* (2006) identificaram, em estudos realizados ao longo do rio Maecuru, no estado do Pará, que é constituída por camadas de arenitos e pelitos flúvio-deltaicos a neríticos.

Esta formação é dividida, segundo Caputo (1984) em dois membros: 1) Membro Jatapu e 2) Membro Lontra. O primeiro é composto por arenitos marinhos cinzentos e muito bioturbados que apresentam localmente intercalações de folhelhos e siltitos, enquanto o segundo é constituído por arenitos marinhos com influência deltaica, num grande sistema fluvial entrelaçado, de seleção variada, assim como pequenas lentes de siltitos.

Formação Ererê

As rochas da Formação Ererê foram depositadas durante o Meso-Devoniano.

Segundo Caputo (1984), esta unidade é constituída por siltitos e folhelhos

carbonatados, ocorrem argilitos e pequenas lentes de arenitos. Ainda o autor atribui a estes depósitos sedimentares um ambiente marinho mais profundo que às unidades sotopostas.

Pastana (1999) descreve a ocorrência desta unidade na borda norte da Bacia do Amazonas, segundo uma faixa aproximadamente paralela à Formação Maecuru onde predominam intercalação de siltitos, arenitos e folhelhos.

3.1.2.2.2 Grupo Curuá

Após o pulso regressivo seguiu-se a deposição do Grupo Curuá antes denominada como formação. Esta unidade, descrita por Caputo (1984) abrangia apenas o folhelho negro encontrado acima da Formação Ererê, porém, foi redefinida e subdividida em quatro formações (Barreirinha, Curiri, Oriximiná e Faro).

Cunha (2001) atribui à fauna do Grupo Curuá, influência de ambiente com deposição de folhelhos escuros.

Formação Barreirinha

Posicionada geocronologicamente no Neo-Devoniano, é constituída de folhelhos negros betuminosos, que representam afogamento da bacia pela água do mar, gerado no período de grande transgressão marinha mundial que proporcionou condições anóxicas para a geração destas rochas. Tal fenômeno de transgressão afetou também as bacias do Parnaíba e Paraná, identificado por Caputo, (1984).

Formação Curiri

A Formação Curiri foi proposta por Lange (1967) e foi caracterizada por Pastana *et al.* (1978) por possuir intercalações e interlaminações de folhelhos e siltitos com arenitos subordinados.

Caputo (1984) define que as rochas desta unidade foram depositadas em períodos glaciais e interglaciais e correspondem a siltitos e argilitos bioturbados na base e diamictitos maciços gradando a folhelhos para o topo.

Formação Oriximiná

Esta formação é datada, por Cunha *et al.* (1994) para o intervalo Devoniano e Carbonífero (Mississipiense Inferior) da Bacia do Amazonas. Esta unidade consiste em argilitos e siltitos intercalados por corpos de arenitos finos de

espessura variável. Os arenitos possuem granulação variando de fina à média, com características mineralógicas e texturais variáveis, por vezes assemelhando-se às rochas da Formação Curiri, o que sugere passagem transicional entre a deposição das duas formações.

Caputo (1984) descreve que a seção basal desta formação, é composta por arenitos finos a médios, com estratificação cruzada, que podem representar areias litorâneas transgressivas. Sobreposto a este nível são descritos diamictitos similares aos da Formação Curiri.

Formação Faro

A Formação Faro ocorre na porção periférica do Domo de Monte Alegre e corresponde ao topo do Grupo Curuá. Esta formação estende-se entre as épocas Tournaisiano ao Viseano do período Mississipiano da bacia, conforme o posicionamento da carta estratigráfica proposta por Cunha *et al.* (1994).

A unidade é constituída principalmente por arenitos regressivos selecionados, intercalados por folhelhos negros com matéria orgânica e diamictitos maciços (CAPUTO, 1984). Segundo os estudos realizados por aquele autor, a análise faciológica de testemunhos de sondagem da Formação Faro permitiu a interpretação de um sistema deposicional dominado por ondas.

3.1.2.3 Sequência Permo-carbonífera

Após o hiato deposicional associado à Orogenia Eo-Herciniana, posicionada no Mississipiano superior, indicado por Cunha *et al.* (1994), iniciou-se a intercalação de depósitos formados por clásticos carbonatos e evaporitos continentais e de ambiente marinho restrito do Grupo Tapajós.

A retomada da sedimentação predominantemente continental provavelmente associada aos efeitos da Orogenia Tardi-Herciniana resultou nos arenitos e folhelhos avermelhados da Formação e Andirá.

3.1.2.3.1 Grupo Tapajós

Este grupo é um conjunto sedimentar de quase 2.400 metros de espessura na parte central da bacia (CUNHA *et al.*, 1994), é datado do intervalo entre o final do Carbonífero (Mississipiano) e o Permiano e inclui as formações Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda e Andirá.

Formação Monte Alegre

A Formação Monte Alegre tem uma ampla área de exposição subparalela às unidades da borda da Bacia do Amazonas, estendendo-se continuamente para o sul, contornando grande parte da estrutura dômica.

Descrita por Cunha *et al.* (1994) para a seção do Carbonífero (Mississipiano superior), a unidade consiste em conglomerados basais cobertos por arenitos de seleção média. Em subsuperfície são arenitos finamente selecionados que afloram sobre a unidade, bem como folhelhos cinza intercalados por corpos de calcários e dolomitos depositados num ambiente marinho raso, próximos ao topo da unidade. Segundo Caputo (1984), essas rochas foram depositadas sob influência de um sistema fluvio – eólico, o qual começa a indicar variações climáticas que aconteceriam no Carbonífero Superior.

Formação Itaituba / Nova Olinda

Estudos realizados por Pastana *et al.* (1978) na região de Monte Alegre, não foram suficientes para individualizar as rochas das formações Itaituba e Nova Olinda, face às similaridades litológicas, estruturais e morfológicas, assim os autores agruparam os conjuntos observados em uma única unidade denominada de “Formações Itaituba/Nova Olinda”. Ainda naquele trabalho Pastana *et al.* (1978) descrevem os litotipos desta unidade como formados por arenitos na porção inferior do pacote, contendo intercalações de folhelhos, siltitos e, mais raramente, calcário.

Nesta unidade ocorrem importantes jazidas de calcário, como as encontradas na região da Mulata que se sita ao norte de Monte Alegre conforme mostra o mapa da Figura 3.5. Os calcários são mais frequentes na porção mediana do nível estratigráfico, geralmente na forma de lentes, de coloração cinza escura, compactos, fossilíferos, contendo intercalações de folhelhos e siltitos.

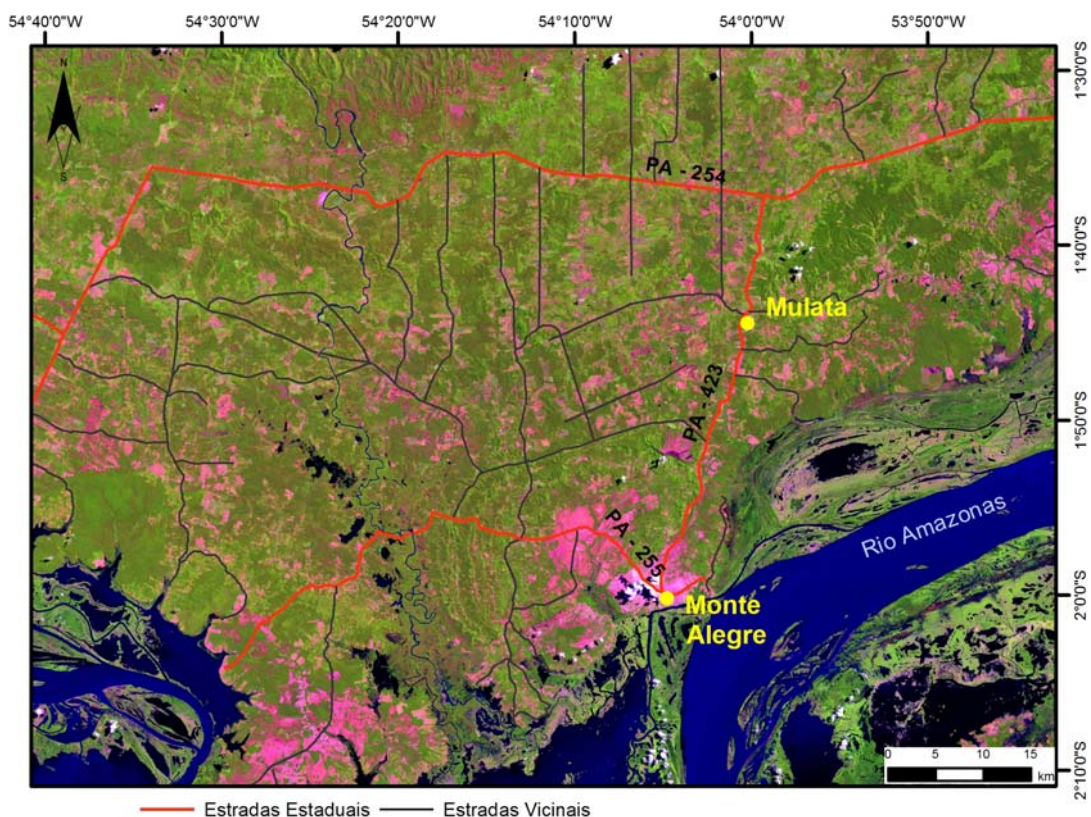


Figura 3.5: Localização da região da Mulata, que situa-se à aproximadamente 30 km sentido Norte da cidade de Monte Alegre. Fundo imagem Landsat 7 ETM+ (RGB 543).

Formação Andirá

A retomada da sedimentação predominantemente continental provavelmente associada aos efeitos da Orogenia Tardi-Herciniana, descrita por Cunha *et al.* (1994), resultou nos arenitos e folhelhos avermelhados da Formação Andirá.

Matsuda *et al.* (2004) caracterizam esta formação como composta por rochas siliciclásticas avermelhadas, com intercalações de carbonatos e raros evaporitos, depositados em sua maior parte em ambiente fluvial/lacustrino a marinho restrito.

3.1.2.4 Sequência Cretácea-terciária

O término da sedimentação paleozóica na Bacia do Amazonas foi atribuído à Orogenia Gonduanide, relacionada à colisão final dos continentes Laurásia e Gondwana. Aparentemente, do Triássico ao Cretáceo teria cessado a subsidência da bacia, mas neste intervalo de tempo ocorreu o magmatismo básico Penatecaua, de idades neotriássica e jurássica, com numerosas intrusões

de soleiras de diabásio (CUNHA *et al.*, 1994).

Cunha *et al.* (1994) atribui que em consequência de esforços na direção Norte-Sul podem ter fraturado o Escudo das Guianas e afetado transversalmente a Bacia Amazônica, provocando soerguimento generalizado, originando discordância regional. Este extenso processo de erosão pode ter removido cerca de 1.000 m de sedimentos da Formação Andirá na Bacia do Amazonas.

O magmatismo que afetou a Bacia do Amazonas entre o Permiano e o Cretáceo foi intenso, condicionado por lineamentos NS e NNE (TEIXEIRA, 1978), e suplantou os limites da área sedimentar, atingindo espessuras superiores a 800m e volume de cerca de 90.000 km³ (WANDERLEY FILHO, 1991). Segundo Aires (1984), o magmatismo se desenvolveu como resultado de processos distensivos, preferencialmente nos cruzamentos de grandes lineamentos.

Rezende (1971) atribuiu um caráter repetitivo ao vulcanismo e o associou aos estágios críticos do regime de fragmentação do Gondwana. Amaral (1974) relacionou os principais eventos magmáticos fanerozóicos ao desenvolvimento do Cinturão Andino.

Thomaz Filho *et al.* (1974) propuseram dois eventos magmáticos principais: o primeiro, associado à separação da América do Norte em relação ao conjunto América do Sul-África, com atividade principal em 250, 230 e 200 milhões de anos (m.a.); o segundo, associado à separação da África e América do Sul, com atividades importantes em 180, 150 e 125 m.a., com o que concordaram Teixeira (1978) e Aires (1984).

A Sequência Cretácea-terciária ocupou os espaços resultantes da Orogenia Andina representada pelas rochas do Grupo Javari, depositando sobre a superfície de discordância do topo do Paleozóico. A base do grupo é caracterizada por depósitos arenosos provenientes de sistema fluvial de alta energia denominada Formação Alter do Chão e o topo pela Formação Solimões representada por pelitos com restos de conchas e vegetais.

3.1.2.4.1 Grupo Javari

Após um relaxamento de esforços compressionais, relatado por Cunha *et al.* (1994), foram criados sítios deposicionais representados pelo Grupo Javari, que foram depositados diretamente sobre a superfície de discordância do

topo do Paleozóico.

Formação Alter do Chão

Cunha *et al.* (1994) atribui à deposição dos sedimentos desta formação à instalação de um sistema fluvial arenoso de alta energia no Neocretáceo, atuante até o Neógeno, que se estendeu até as bacias subandinas.

Formação Solimões

Com a mudança de clima árido para úmido, apontado por Cunha *et al.* (1994), a drenagem provavelmente corria para oeste. Com o soerguimento da Cadeia Andina e consequente compensação isostática, os rios transformaram-se em lagos doces e rasos, alimentados por rios de baixa energia, depositando os pelitos da Formação Solimões.

3.1.3 Domo de Monte Alegre

Fred Hartt em 1870, que participava da expedição Morgan, ao descer rio Amazonas, se deparou com uma região montanhosa em meio à planície do rio, com altura de cinco ou seis centenas de metros ou mais. Ele descreve a região Ererê-Monte Alegre como montanhas tabulares que se destacam no relevo, composta de leitos horizontais de argilas e areias, de provável idade terciária. Nesta expedição, Hartt descreve essas montanhas com topo plano, porém com superfície suavemente arredondada, descendo para a planície, tanto para leste quanto para oeste, por encostas graduais e descidas abruptas sendo estas pouco frequentes, exceto no lado sul.

Moura & Wanderley (1938) estudando o relevo da Amazônia descreve a região do domo de Monte Alegre como uma coroa de serras que circundam a planície do Ererê e concluiu que o diastrofismo responsável por derrames de rochas básicas, provocou a formação deste.

Rezende & Brito (1973) referem-se às direções NW/SE, presentes no embasamento do Escudo das Guianas, com características marcantes e sistemáticas e que estas estruturas foram afetadas e reativadas por um tectonismo que deformou a calha central da bacia com direção NE/SW e no seu cruzamento favoreceu a intrusão ígnea posterior na forma de um lacólito. Os principais esforços atuantes neste evento afetaram as rochas da seção

Carbonífera – Devoniana e como resposta a estes esforços foi o dobramento e consequente soerguimento sub-crustral.

Montalvão & Oliveira (1975) também atribuem a origem dômica às intrusões toleíticas básicas, tendo sido os primeiros a denominarem a estrutura como braquianticlinal com forma elipsóide com 30 km de comprimento e 20 km de largura. Em 1976, Araujo *et al.* apresentam datações de 183-135 ma pelo método K/Ar para os diques na região de Monte Alegre.

Morgan (1983) atribui como gerador da estrutura dômica de Monte Alegre, à presença de um *hot spot*. A trajetória deste, com ponto inicial na Venezuela, ao decorrer da separação da África passou pela Amazônia, pelo centro-leste brasileiro e atualmente encontra-se na Ilha de Trindade, no Oceano Atlântico. Ainda para o autor a atuação deste *hot spot* na Amazônia, mais especificamente, na região de Monte Alegre, configurou-se através de manifestações ígneas que desencadearam um soerguimento evidenciado por enxames de diques e soleiras de diabásio.

Embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos nesta área com intuito de definir sua origem de formação e eventos de deformação, estes não foram conclusivos na sua totalidade. Desta forma existe ainda uma discussão quanto sua origem.

Almeida & Pinheiro (2007) atribuem ao soerguimento por intrusões papel secundário e que este pode representar uma estrutura de inversão tectônica positiva no contexto da Bacia do Amazonas. Pastana *et al.* (1999), por outro lado, definem sua origem à uma intrusão magmática.

A região mapeada de Monte Alegre engloba rochas sedimentares do Grupo Trombetas até os arenitos da Formação Alter do Chão. A área delimitada da Figura 3.6A, corresponde às rochas sedimentares da Bacia do Amazonas e também a rochas do Escudo das Guianas. A Figura 3.6B apresenta o mapa geológico regional.

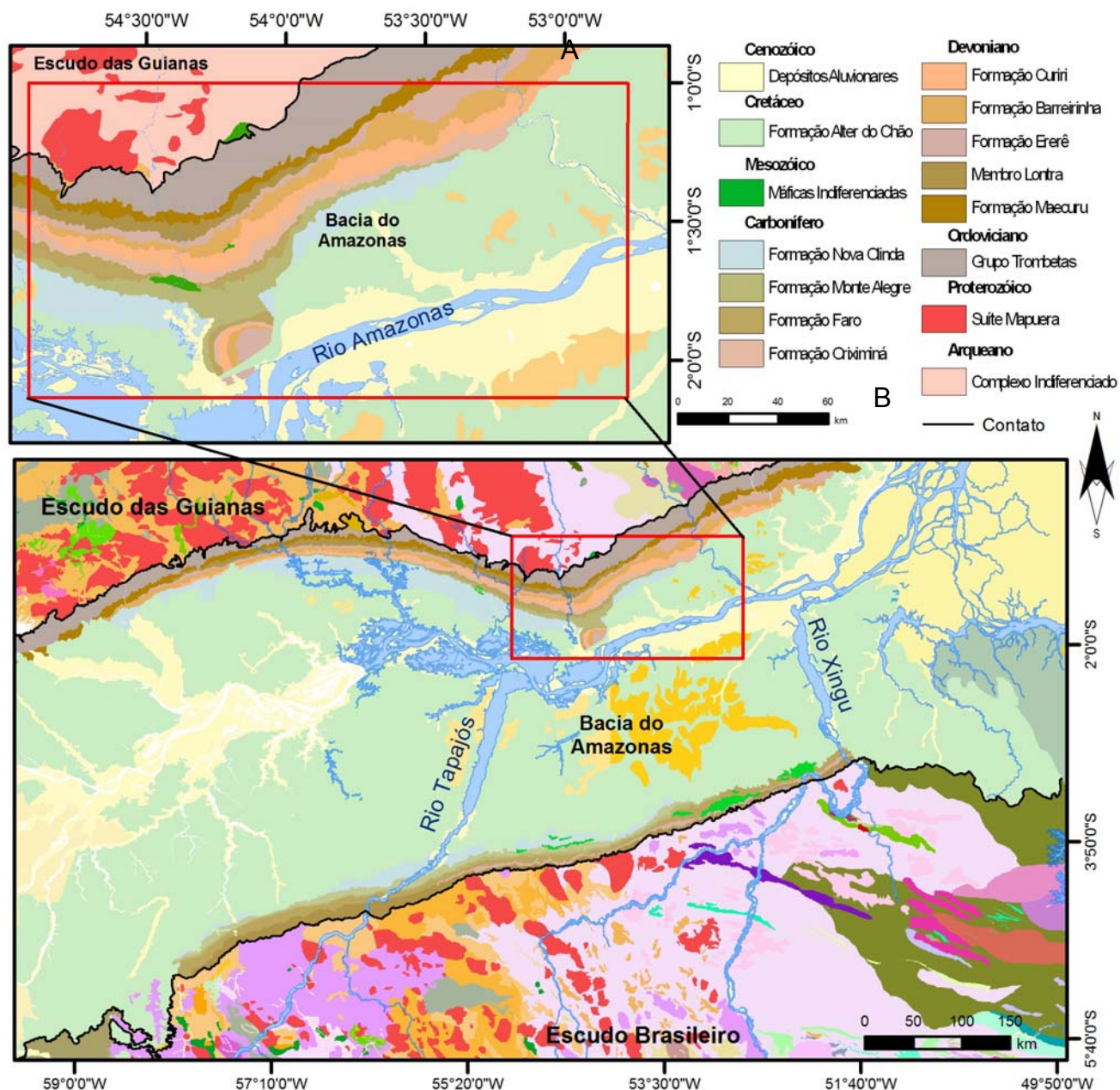


Figura 3.6: A) Mapa Geológico de detalhe da área do Domo do Monte Alegre. B) Mapa de parte da região amazônica. Fonte: CPRM (2008).

4 GEOLOGIA DO DOMO DE MONTE ALEGRE

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos a partir dos levantamentos estratigráficos de campo, realizados em conjunto com integrantes do Projeto CATEA. A análise estratigráfica baseou-se nas descrições de campo dos afloramentos visitados na região do Domo de Monte Alegre e Serra Azul (Figura 4.1) onde obteve-se a descrição de fácies sedimentares, suas relações de contado e geometria da estrutura. Em campo as rochas foram analisadas e comparadas aos mapas geológicos de Pastana (1999) e CPRM (2008), e referências bibliográficas clássicas sobre a estratigrafia da Bacia do Amazonas (e.g. Caputo 1984, Cunha *et al.*, 1994).

Na área dos pontos levantados em campo foram descritas rochas das formações Manacapuru do Grupo Trombetas, Ererê do Grupo Urupadi, Barreirinha, Curiri, Oriximiná e Faro do Grupo Curuá e formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda do Grupo Tapajós.

Propõe-se neste trabalho apresentar uma mudança no mapa da CPRM, (2008) onde na borda sul do DMA era inicialmente era mapeado como Formação Ererê, agora tratam-se de arenitos da Formação Alter do Chão conforme apresenta a Figura 4.1. O perfil esquemático da Figura 4.2 representa a distribuição das camadas observadas no mapeamento geológico.

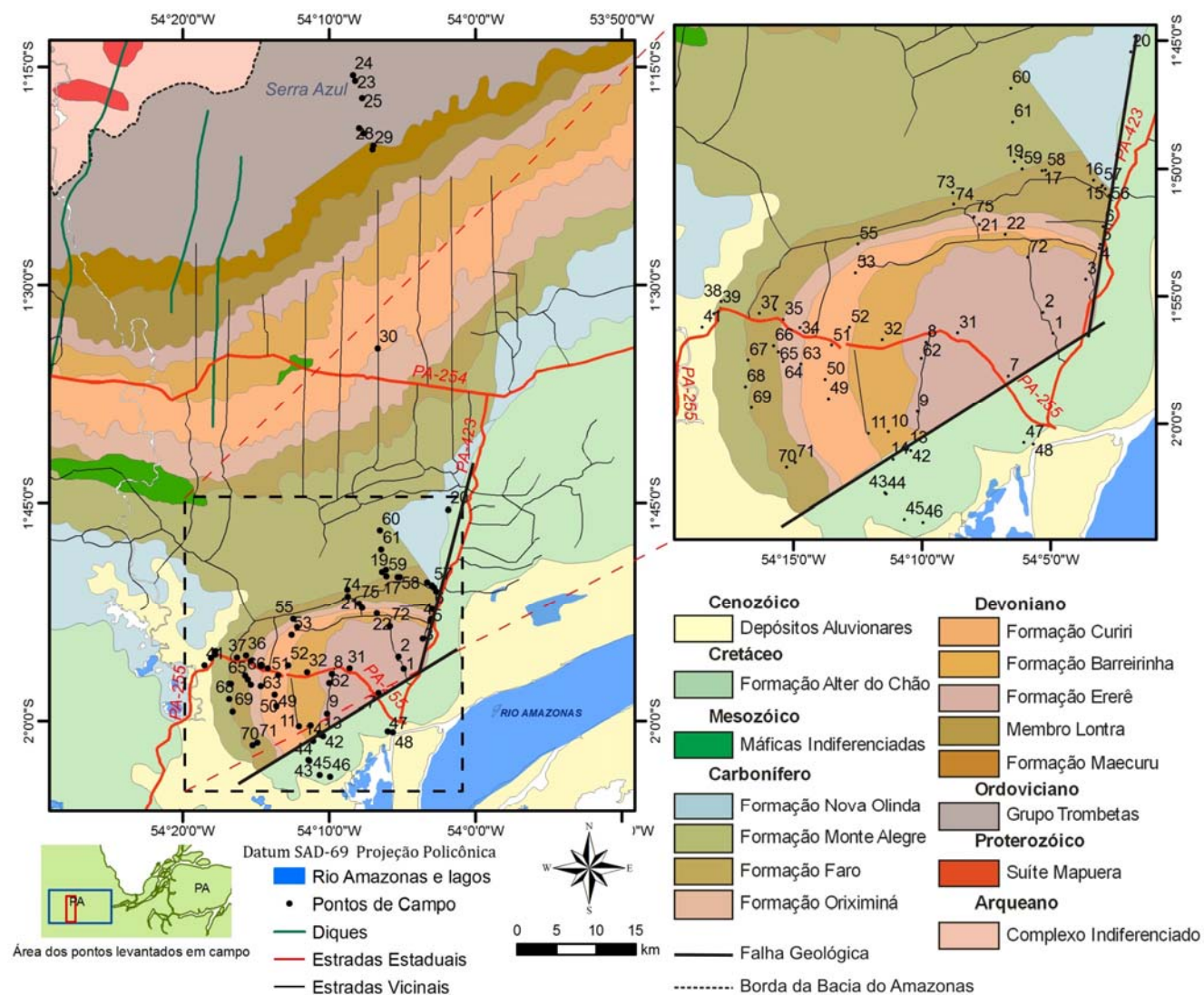


Figura 4.1: Mapa geológico da região do Domo de Monte Alegre e a distribuição dos pontos mapeados. Mapa modificado de CPRM (2008).

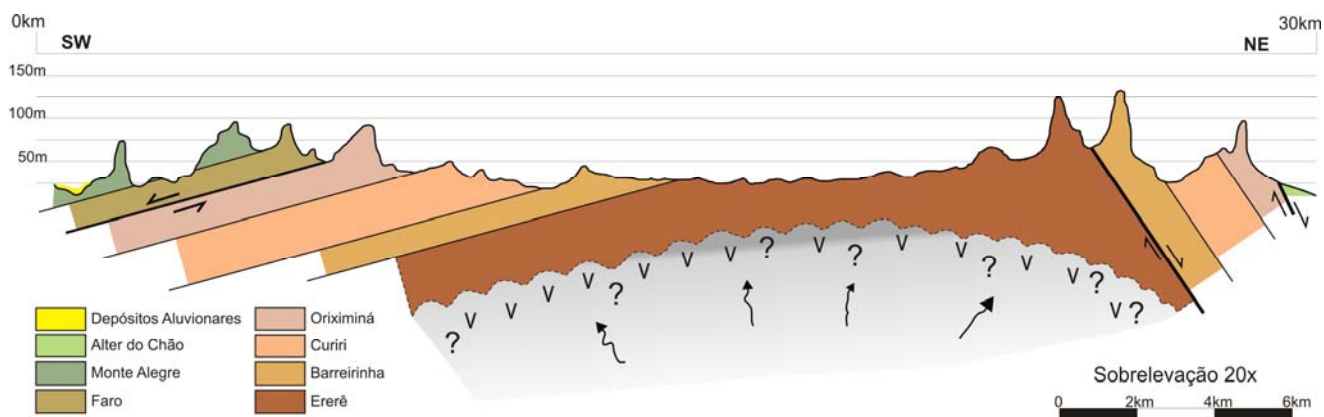


Figura 4.2: Perfil esquemático do Domo de Monte Alegre com orientação SW/NE que representa a distribuição das camadas litoestratigráficas.

Grupo Trombetas - Formação Manacapuru

Os pontos mapeados desta unidade encontram-se exclusivamente na região da Serra Azul, norte da área.

Os sedimentos que constituem a Formação Manacapuru foram depositados durante o Neo-Siluriano e o Eo-Devoniano, com camadas de arenitos intercaladas com níveis de siltitos, folhelhos e argilitos. Os arenitos possuem predominantemente granulação fina, grau de seleção alto, cor esbranquiçada e ocorrem na forma de ciclos granodescendentes bem definidos, com espessura média de 10 cm. Encerrando os ciclos, é comum observar presença de camadas centimétricas de argilitos. Geralmente, próximo ao topo das camadas, ocorrem marcas onduladas e *climbing ripples*. A estratificação predominante é planoparalela.

A variação litológica observada pode ser agrupada em quatro fácies principais da base para o topo. A fácies A é composta por arenitos finos, homogêneos. As camadas possuem espessura variando de 1 a 2 metros de espessura. Essa fácies possui gradação inversa de arenito muito fino para arenito fino, onde a estrutura predominante é estratificação acanalada de pequeno porte.

Localmente, os arenitos encontram-se maciços. A fácies B é composta por arenitos muito finos com laminação plano-paralela truncada por onda. As camadas possuem espessura média de 20 cm. A fácies C é composta por arenitos muito finos a finos com *climbing ripples*. A fácies D é composta por arenitos médios com gradação normal e estratificação cruzada acanalada de médio porte (Figura 4.3).



Figura 4.3: Afloramento de arenitos da Formação Manacapuru com marcas onduladas e *climbing ripples*. Ponto MA -25 coordenadas 54°7'46,08"W / 1°17'35"S.

Grupo Urupadi - Formação Ererê

As rochas da Formação Ererê caracterizam-se por intercalações rítmicas de siltitos, folhelhos e arenitos, com predomínio de ritmitos pelíticos na base e ritmitos arenosos no topo. As sequências compostas predominantemente por siltito possuem laminação plano-paralela, microestratificações cruzadas, laminação lenticular e marcas onduladas (Figura 4.4) com intercalações de níveis de arenito fino. Estes arenitos possuem grau de seleção alto e são maduros mineralogicamente e com aproximadamente 15% de matriz argilosa.



Figura 4.4: Plano com marcas onduladas localizado na pedreira do ponto MA-07 (54°6'37,66"W / 1°58'7,07"S), limite da borda sudeste do DMA.

Ainda no ponto MA-07 os níveis descritos são compostos principalmente por arenitos de granulação média com grau de seleção moderado, que se encontram intercalados a níveis de folhelho. As estruturas primárias descritas são caracterizadas por laminação plano-paralela, laminação ondulada, *climbing ripples* e *microhummockies*.



Figura 4.5: Afloramento ritmitos pelíticos na base e ritmitos arenosos para o topo da Formação Ererê, localizados no ponto MA-07 (54°6'37,66"W / 1°58'7,07"S).

No afloramento do ponto MA-03A, situado nas imediações da PA-423, foi descrito arenito de cor castanha, composto por grãos de quartzo com granulação fina e granulometria sub-milimétrica, bem selecionado, cimentado por material filossilicático, associado a material castanho de composição ferruginosa. As laminações observadas nesta rocha são comumente marcadas pela presença mais acentuada de material ferruginoso.

As características identificadas nesta unidade estão de acordo com as descritas por Pastana (1999), que descreve a porção central do Domo de Monte Alegre como representado por siltitos duros, fraturados, cinza azulados, horizontalizados, estratificados em bancos, com delgadas intercalações de folhelho cinza a amarelado.

Grupo Curuá - Formação Barreirinha

Em campo, esta formação é composta por folhelhos de cor cinza escuro (Figura 4.6), localmente com intercalação de camadas centimétricas de siltitos de cor cinza com laminação do tipo wavy.



Figura 4.6: Folhelho da Formação Barreirinha, localizado no ponto MA-50 ($54^{\circ}13'44,87''\text{W}$ / $1^{\circ}58'14,86''\text{S}$), região oeste do Domo de Monte Alegre.

Grupo Curuá - Formação Curiri

Esta formação é constituída predominantemente, por siltitos micáceos e secundariamente arenitos finos, que variam de cinza esverdeado a castanho. Foram identificadas laminação lenticular, laminação plano-paralela e *climbing ripples*.

No ponto MA-34, afloramento localizado na PA-255 na porção oeste do DMA (Figura 4.7), foi descrito um siltito litificado com presença de magnetita.



Figura 4.7: Siltitos esverdeados da Formação Curiri do ponto MA-34 ($54^{\circ}14'43,63''\text{W}$ / $1^{\circ}56'13,74''\text{S}$).

Já na borda N/NE da estrutura dômica, no ponto MA-22 foram descritos siltitos com grãos angulosos de quartzo e matriz argilosa, tendo sido observadas laminação plano paralela e lenticularizada, com *climbing ripples* localizados.



Figura 4.8: Siltitos com tons arroxeados e amarelados encontrado na borda norte/nordeste do DMA. Ponto MA-22 ($54^{\circ}6'44,65''W$ / $1^{\circ}52'35,55''S$).

Grupo Curuá - Formação Oriximiná

Os arenitos mapeados nesta unidade caracterizam-se predominantemente, por arenitos intercalados com níveis de siltitos. Possuem granulação fina à média, com características mineralógicas e texturais variáveis. As estruturas sedimentares observadas são estratificação plano-paralela, laminação lenticular irregular, estratificação cruzada de baixo ângulo (sugerindo truncamento por onda), truncamento de baixo ângulo em cunha, laminação tipo *flaser* (Figura 4.9) e laminação ondulada.



Figura 4.9: Laminação tipo *flaser* encontrado nos arenitos da Formação Oriximiná. Ponto MA-40 ($54^{\circ}18'4,52''W$ / $1^{\circ}55'41,24''S$).

Os arenitos da Formação Oriximiná exibem cor variando de castanho a branco amarelado em função da maior presença de material ferruginoso. Constituem-se, macroscopicamente, por grãos de quartzo de granulação fina e granulometria sub-milimétrica, bem selecionados, com esfericidade média, subarredondados a subangulosos.

Nas proximidades da localidade de Maxirá encontrou-se também um afloramento de siltito com laminação bem definida desta unidade, conforme se pode visualizar na Figura 4.10.



Figura 4.10: Siltitos da Formação Oriximiná encontrado no ponto MA-64 ($54^{\circ}15'22,43''\text{W}$ / $1^{\circ}57'32,95''\text{S}$).

Grupo Curuá - Formação Faro

Verificou-se em campo que também ocorre siltito amarelo acinzentado, conforme visto na Figura 4.11, cuja estrutura sedimentar mais comum é a estratificação cruzada tabular de pequeno porte, ocorrendo, secundariamente, estratificação cruzada sigmoidal.

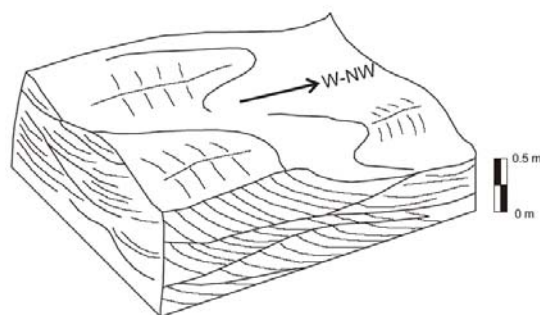
No ponto MA-41 situado nas imediações da PA-255, região extremo oeste do domo, há estruturação maciça e estratificações cruzadas festonadas e acanaladas e localmente formas de leito com geometria linguóides com migração para NW. Neste ponto a rocha é um arenito médio, bem selecionado, limpo, com grãos arredondados e com esfericidade alta (Figura 4.12).



Figura 4.11: Siltitos da Formação Faro encontrados no ponto MA-70 ($54^{\circ}15'14,7''\text{W}$ / $2^{\circ}1'42,07''\text{S}$), região SW do Domo de Monte Alegre.



A



B

Figura 4.12: (A) Leitos com formas linguóides. (B) desenho esquemático das formas de leitos linguóides e as estratificações associadas (Ponto MA-41 - $54^{\circ}18'31,97''\text{W}$ / $1^{\circ}56'11,93''\text{S}$).

Grupo Tapajós - Formação Monte Alegre

As rochas observadas desta unidade são essencialmente arenitos com variações granulométricas que vão desde arenitos finos até arenitos conglomeráticos. Possuem variação de cor, de cinza esbranquiçado a cinza avermelhado. Composicionalmente são maduros, bem selecionados e há pouca ou ausência de matriz (<5%), sendo os grãos arredondados a subarredondados. A estrutura sedimentar predominante é a estratificação cruzada tabular de pequeno e grande porte (Figura 4.13).

Na região norte do domo, no ponto MA-59, em leito da estrada, encontrou-se arenito com marcas onduladas e presença de bioturbações,

conforme apresentado na Figura 4.14. Já no ponto MA-73, situado a norte do domo, ocorre arenito (Figura 4.15) com estratificação cruzada e grãos sub-arredondados de alta esfericidade.



Figura 4.13: Estratificação cruzada de médio porte, localizada na margem do Igarapé Açu na borda norte do DMA. Ponto MA-18 ($54^{\circ}6'7,28''W$ / $1^{\circ}49'33,27''S$).



Figura 4.14: Arenitos da Formação Monte Alegre com presença de marcas onduladas e bioturbações. Ponto MA 59 ($54^{\circ}6'5,17''W$ / $1^{\circ}50'0,42''S$).



Figura 4.15: Arenitos com grãos sub-arredondados, com esferecidade alta e estratificação cruzada presente no ponto MA-73 (54°8'46,36"W / 1°50'56,37"S) situado na borda norte do DMA.

Grupo Tapajós - Formação Itaituba / Nova Olinda

Nesta unidade ocorrem importantes jazidas de calcário, como as encontradas na localidade de Mulata à norte de Monte Alegre. Os calcários são mais frequentes na porção mediana do nível estratigráfico, geralmente na forma de lentes, fossilíferos, contendo intercalações de folhelhos e siltitos na base. Na porção superior desta unidade ocorrem delgadas intercalações de folhelhos, arenitos, siltitos e, mais raramente, calcários.

Na Pedreira Calpará, ponto MA-20, localizado na região da Mulata (Figura 4.16), foi possível observar uma excelente exposição de uma sequência carbonática com aproximadamente 20m de espessura, onde foram identificados 3 níveis distintos (Figura 4.17).

Na base predominam calcários calcíticos laminados com acamamento irregular, com estruturas *mudstones* e *wackestones*, ora com laminação fina, definida pela variação de cores de cinza, ora com aspecto maciço ou lenticular. Ainda há presença de níveis de bivalves, pedaços de conchas concentrados e tubos verticais e inclinados (Figura 4.18).

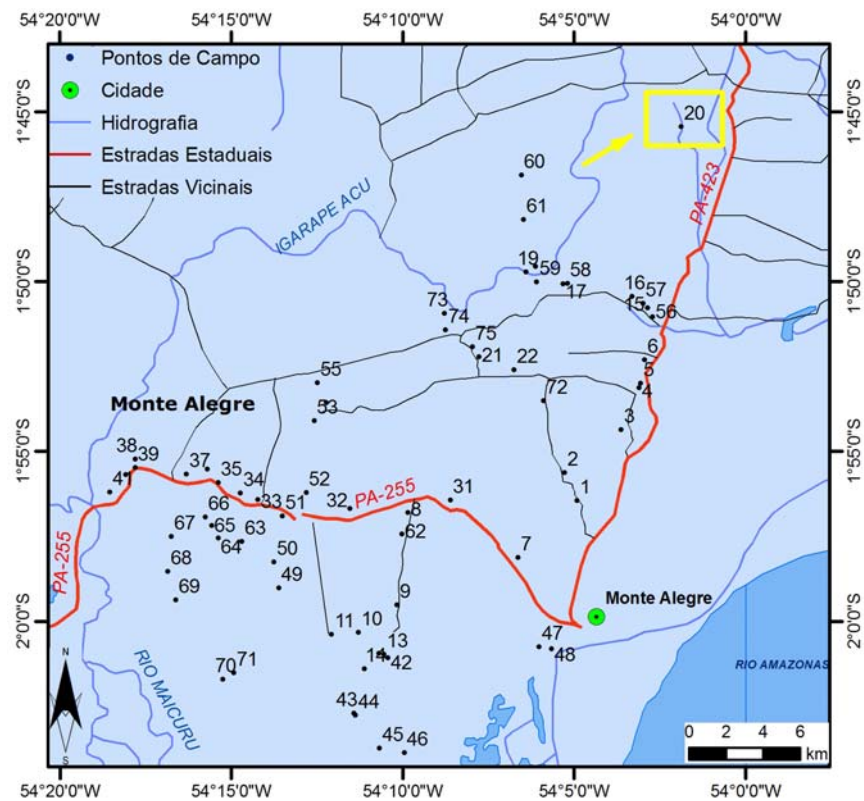


Figura 4.16: Localização do ponto MA-20 ($54^{\circ}1'51,72''\text{W}$ / $1^{\circ}45'27,18''\text{S}$) com destaque em caixa amarela.



Figura 4.17: Vista geral da frente de lavra da pedreira Calpará, ponto MA-20, situado na localidade de Mulata, região norte de Monte Alegre onde ocorrem calcários calcíticos laminados.

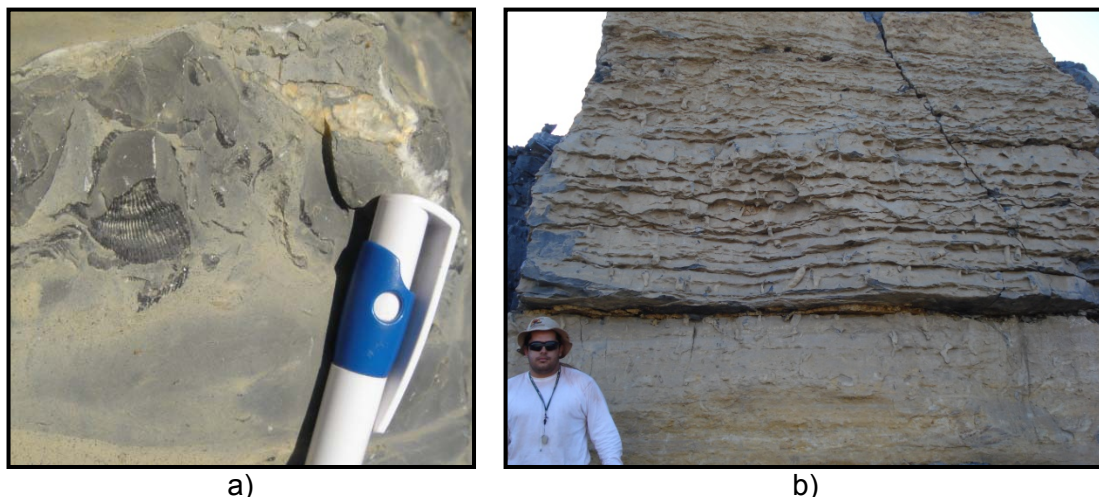


Figura 4.18: a) Calcário calcítico com nível onde ocorrem pedaços de conchas e b) tubos verticais e inclinados.

Na porção intermediária da sequência observada nesta pedreira, ocorre também um nível de aproximadamente 2,5 m de folhelho cinza arroxado (Figura 4.19).



Figura 4.19: Folhelhos cinza arroxados localizado na pedreira Calpará – ponto MA-20.

Ainda no ponto MA-20, em direção ao topo da sequência, inicia-se uma associação de fácies calcareníticas, com base irregular sobre os folhelhos, onde predominam camadas métricas de calcirrudito com restos de bivalves e intraclastos de pelito em camadas mais espessas e maciças.



Figura 4.20: Topo da sequência descrita no ponto MA-20 caracterizada como uma fácies calcarenítica.

Magmatismo Penatecaua

As rochas ígneas, associadas ao Magmatismo Penatecaua, foram mapeadas tanto como diques, quanto em soleiras.

Na pedreira Três Bocas, da empresa Fidens (ponto MA-21), ocorre excelente exposição de uma soleira, que permitiu um levantamento detalhado tanto para informações litofaciológicas quanto estruturais.

Nesta pedreira (Figura 4.21) aflora um gabro acinzentado, com textura fanerítica inequigranular a inequigranular porfirítica, composta por piroxênio, plagioclásio e biotita (Figura 4.22). Localmente, foram identificados planos de falhas com presença de quartzo euédrico cristalizado na porção ortogonal à fratura (Figura 4.23) e quartzo e piroxênio euédrico, indicando processos hidrotermais durante o resfriamento.

A variedade de granulação fina à média (microgabro) foi identificada nos pontos MA-27 e 39. Em escala de afloramento, a rocha exhibe cor cinza esbranquiçado, composta por plagioclásio, piroxênio, pouco quartzo; com

granulação fina, textura fanerítica equigranular fina, ofítica à subofítica e índice de cor melanocrático.

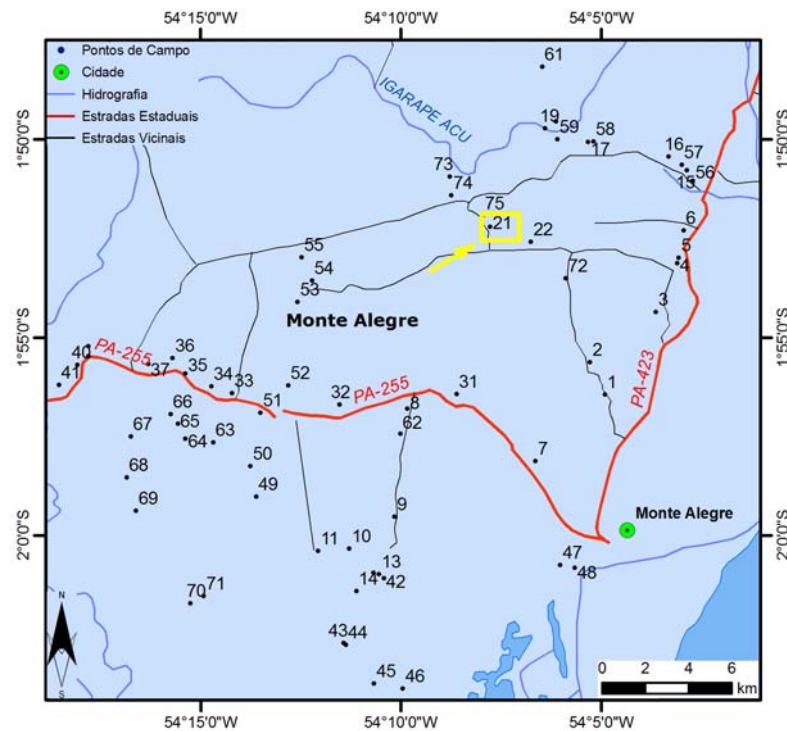


Figura 4.21: Figura de localização do ponto MA-21 ($54^{\circ}7'45,66''\text{W}$ / $1^{\circ}52'12,69''\text{S}$) onde situa-se a pedreira Três Bocas, em destaque amarelo.



Figura 4.22: Ponto MA-21 – Soleira de gabros com presença de arenitos finos no topo.



Figura 4.23: Crescimento de veio de quartzo euédrico ortogonal ao plano de fratura. Ponto MA-21 – Pedreira Três Bocas.

Grupo Javari - Formação Alter do Chão

Os arenitos da Formação Alter do Chão apresentam-se esbranquiçados e róseos (Figura 4.24), com seleção moderada a baixa, onde foram identificadas estratificações cruzadas acanaladas. A presença de estratificações de médio porte é mais comum, mas ocorrem, igualmente, estratificações de pequeno e grande porte.



Figura 4.24: Arenito de cor rósea com estratificação cruzada que localiza-se nas imediações da cidade de Monte Alegre, ponto MA-48 ($54^{\circ}5'38,79''\text{W}$ / $2^{\circ}0'48,27''\text{S}$).

Os afloramentos desta unidade, identificados nas duas etapas de campo, encontram-se basicamente na borda sul do Domo de Monte Alegre, na região da Serra do Ererê e na Pedra do Pilão – Serra da Paytuna (Figura 4.25).



Figura 4.25: Estratificação cruzada tabular na serra do Pilão, localizada na região sul do DMA, descrito como ponto MA-46 ($54^{\circ}9'56,6''\text{W}$ / $2^{\circ}3'51,54''\text{S}$).

5 MORFOESTRUTURAS

A caracterização geomorfológica tem como finalidade analisar as formas do relevo, buscando compreender os processos pretéritos e atuais, bem como os elementos de sua formação. As bases para pesquisa geomorfológica estão nas concepções de Penck (1953 citado por Ross, 1992), que percebeu que as atuais formas do relevo da superfície terrestre são produtos da ação dos processos endógenos (abalos sísmicos, dobramentos fraturas, falhas, vulcanismo) e exógenos (fatores climáticos, processos erosivos).

Como as morfoestruturas são indicadores e registros dos vários eventos ocorridos em uma determinada área, principalmente no que diz respeito às estruturas e aos processos de dissecação superimpostos, procurou-se dar um enfoque específico às Unidades Morfoestruturais envolvidas na área de interesse, com o intuito de elucidar os problemas estruturais e tectônicos no âmbito do domo.

Segundo Ross (1992), as morfoestruturas sustentam o atual relevo e foram geradas a partir de movimentos crustais, cujo produto são formas de relevo controladas por estruturas, como por exemplo, as faixas dobradas, formas vulcânicas, áreas com blocos falhados, entre outras.

Bemerguy *et al.* (2002) descrevem a região de Monte Alegre como um relevo delineado por morfoestruturas, representadas por *cuestas*, relevos dômicos, relevos vulcânicos, blocos soerguidos e interflúvios tabulares com eventuais morros isolados.

Uma das feições morfoestruturais mais marcantes e presentes na região corresponde ao relevo vulcânico, representado por dezenas de diques de diabásio da unidade Penatecaua. Estes diques se destacam em relação ao sistema de relevo colinoso e àquele de serras homoclinais orientadas segundo as direções N-S e NNE-SSW. O controle estrutural dessas rochas é evidenciado por cristas e traços lineares nos *fronts* de *cuestas* e nos vales.

No campo constatou-se que as cristas alinhadas na direção N-S são sustentadas por diques, conforme mostra a foto da Figura 5.1, obtida no topo da Serra do Ererê.

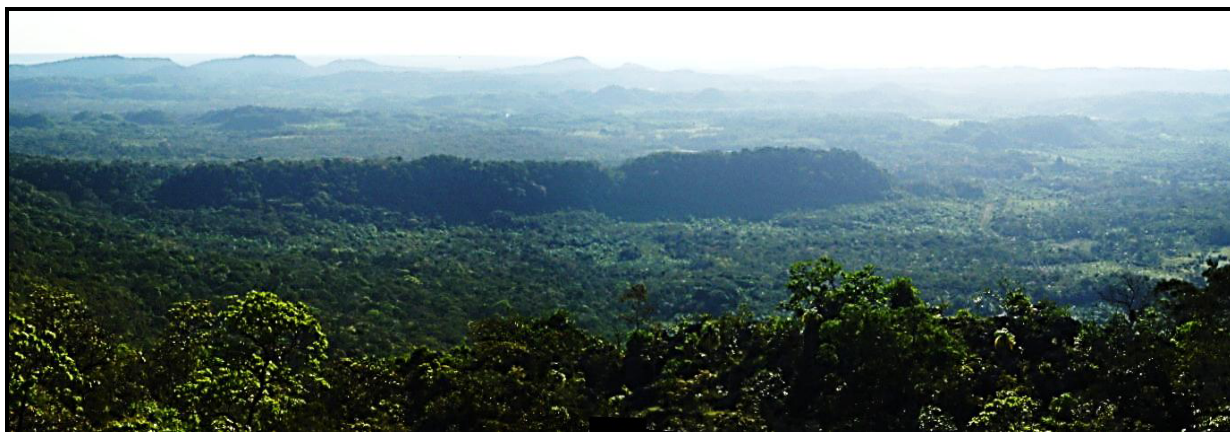


Figura 5.1: Crista com alinhamento N-S, observada a partir da Serra do Ererê, que é sustentada por diques.

A região central do DMA trata-se de uma superfície exumada, bordeadas por serras homoclinais (Figura 5.2), dispostas sob a forma de meio-círculos, modeladas em rochas paleozóicas. As cotas médias variam entre 180 m a 200 m, o centro do domo apresenta a cota mínima de 40m e na Serra do Itauajuri, ponto mais alto da região, atinge a cota de 440 m, conforme apresentada na Figura 5.3.

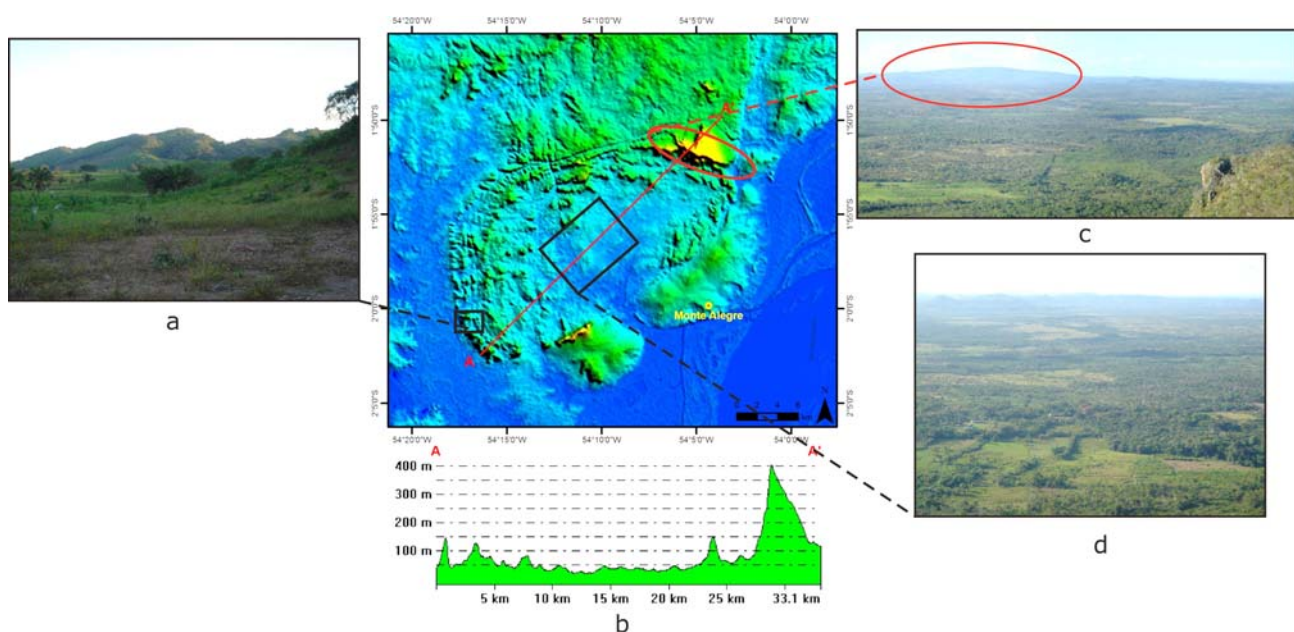


Figura 5.2: a) foto da borda do domo; b) Imagem SRTM do Domo de Monte Alegre e perfil topográfico da seção AA'; c) Serra do Itauajuri situada na borda nordeste com 400m de altitude e d) vista da planície central do domo.



Figura 5.3: Detalhe da região central do Domo de Monte Alegre e ao fundo a Serra do Itauajuri que se destaca no relevo por apresentar altitudes na ordem de 440m.

Neste trabalho, a análise das morfoestruturas presentes na região do Domo de Monte Alegre foi realizada com base nas formas de relevo, por meio das formas e tipos de drenagens, lineamentos obtidos tanto por imagens, quanto por análises geoestatísticas da rede de feições lineares do terreno, utilizando-se de mapas de isovalores.

5.1 ANÁLISE DE DRENAGENS

A análise das anomalias de drenagens foi comparada e complementada às anomalias morfoestruturais proposta por Miranda (1983), como pode ser vista na Figura 5.4. Miranda (1983) utiliza-se de sensoriamento remoto na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Amazonas e apresenta uma sistematização da aplicação dos dados obtidos por imagens orbitais (Landsat e Radar) para a caracterização de anomalias morfoestruturais. A principal intenção do autor foi buscar um método de interpretação adequada às condições ambientais da região amazônica, aproveitando as potencialidades de dados de sensores remotos na identificação de anomalias morfoestruturais que eventualmente estão associadas a possíveis trapas estruturais de hidrocarbonetos.

Para os propósitos deste trabalho procurou-se adaptar o método da hierarquização de parâmetros quantitativos, definidos por Soares *et al.* (1982), os quais levam em consideração aspectos como fator de similaridade, que é uma

medida da organização espacial (e.g. simples incompleta, simples completa, ramificada incompleta e ramificada completa); fator confiabilidade, que indica a intensidade de estruturação dos elementos texturais como o traçado de padrões previamente estabelecidos, expressos em níveis (e.g. muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte). Desta forma foram realizadas análise dos padrões de drenagem e destacadas as estruturas coincidentes.

Na área em questão, estas análises dos padrões de drenagem foram baseadas nos métodos propostos por Miranda (1983) e Soares *et al.* (1982), a partir dos quais procurou-se o reconhecimento de estruturas anômalas, principalmente as de padrões radiais e anelares, apresentados na Figura 2.16. Nesta análise constatou-se a presença de feições dômicas e também outros padrões de drenagem que ao total, permitiu a identificação de 27 anomalias indicadas na Figura 5.4.

Na sequência da análise, as interpretações obtidas foram comparadas aos modelos anteriormente mencionados e, assim, as mesmas foram classificadas e numeradas. Nesta avaliação o mapa da Figura 5.4 mostra que a região estudada apresenta formas enumeradas de 1 a 7 - consideradas radiais centrífugas; as anomalias 25, 26, 17, 18, 20 são estruturas anelares com associações radiais centrípetas e centrífugas (17 apenas no DMA). Praticamente todas essas anomalias estão alinhadas segundo uma estruturação regional NW-SE. Um outro alinhamento regional marcante foi observado, porém na direção NE-SW, que compreende a sequência 14, 15, 16, 17 e 27. A localização destas estruturas com a respectiva numeração é apresentada na Figura 5.4.

Este mapeamento auxiliou no entendimento da evolução estrutural, pois ressaltou as direções predominantes de forma indireta, considerando que são reflexos na superfície de reativações de falhas antigas, com direções, tanto NW-SE, quanto para NE-SW, reconhecidas por diversos autores como direções de falhas do embasamento (e.g.: REZENDE & BRITO, 1973; COSTA, 2002; SENA COSTA & HASUI 2000; SENA COSTA *et al.*, 1996 entre outros).

As demais estruturas são feições anelares simples completas e incompletas, conforme a classificação de Soares *et al.*, (1982) e principalmente estão situadas em terrenos paleozóicos da Bacia do Amazonas.

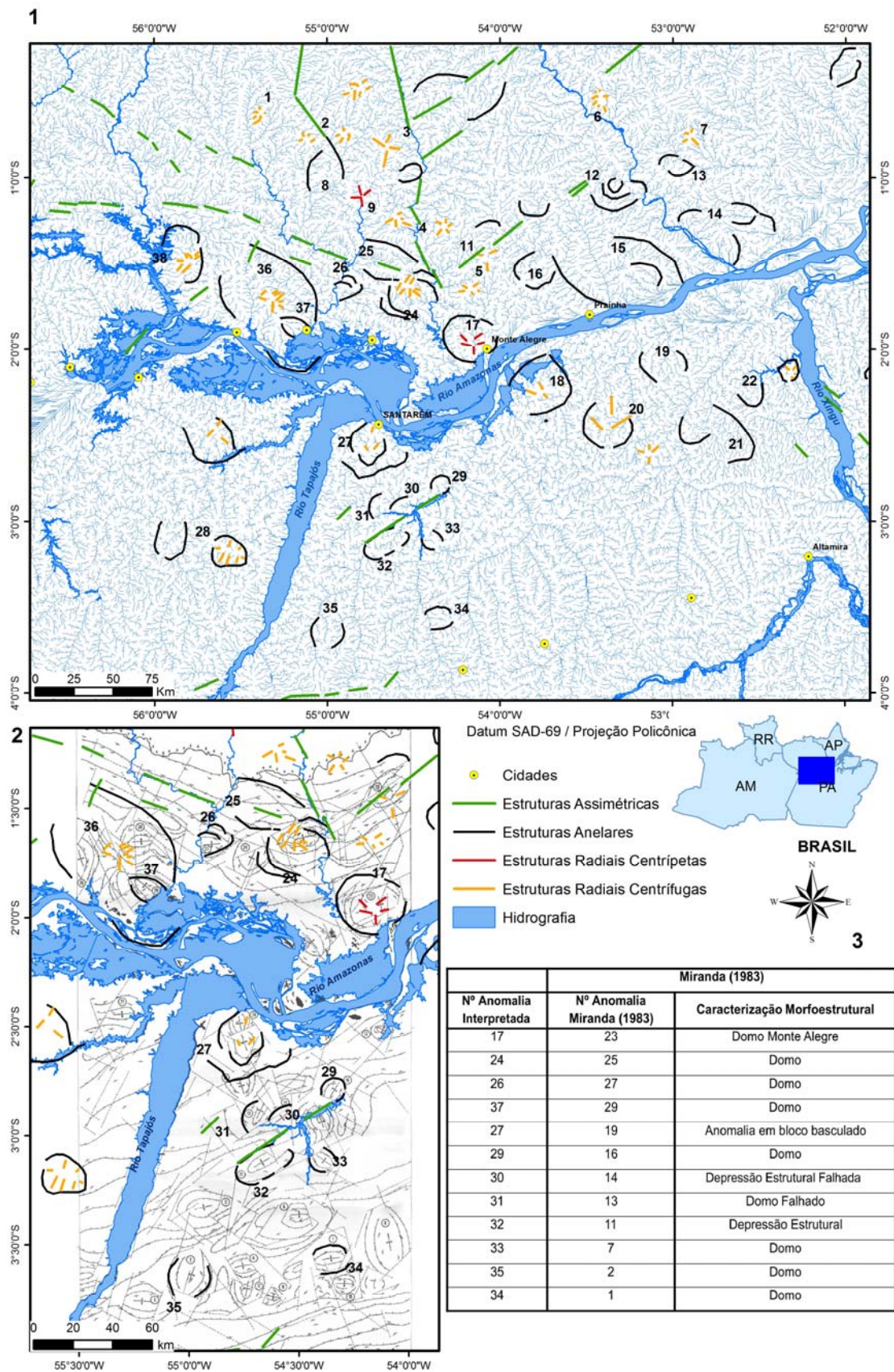


Figura 5.4: (1) - Drenagem teórica extraída na região de Monte Alegre para a interpretação das anomalias de drenagem. (2) - comparação das anomalias morfoestruturais caracterizadas por Miranda (1983) com base na drenagem interpretada em imagens Landsat. A tabela (3) apresenta a relação das anomalias identificadas pelas diferentes técnicas.

Miranda (1983) interpreta a rede de drenagem, extraída de forma manual, em imagens orbitais, e apresenta 30 anomalias de drenagem, das quais listam 23, a partir da hierarquização dos altos morfoestruturais. Nesse *ranking*, o Domo de Monte Alegre ocupa o lugar de destaque, ou seja, apresenta as maiores valorações nos quesitos similaridade e confiabilidade.

A partir da analogia entre as anomalias morfoestruturais de drenagem realizadas por Miranda (1983) e neste trabalho, pode-se correlacioná-las conforme apresentado na tabela da Figura 5.4.

5.2 LINEAMENTOS REGIONAIS COM BASE EM MODELO SRTM 90 M

A análise dos lineamentos foi realizada com base em modelos digitais de elevação, gerados a partir da combinação dos dados por interferometria (SRTM com resolução de 90 m).

Esta análise permitiu a identificação das principais feições lineares ou lineamentos de relevo, independente da sua cobertura vegetal. Com base nos dados do modelo SRTM, utilizando-se os atributos x, y e z foram realizados diversos processamentos com o uso das ferramentas do programa ArcMap que permitiram a geração de mapas de declividade, mapas hipsométricos e de relevo. As ferramentas do ArcMap utilizadas foram, *hillshade* para relevo e *slope* para declividade.

Para a identificação dos lineamentos utilizaram-se critérios como a continuidade e persistência, ou seja, lineamentos isolados não foram contabilizados nesta análise e estes correspondem às feições retilíneas ou levemente curvas representadas por cristas (positivos) e vales (negativos), os quais refletem fenômenos gerados em subsuperfície (Figura 5.5).

O conjunto destes traçados, apresentado no mapa de lineamentos (Figura 5.6), representa a resposta morfoestrutural na superfície. O mapa de lineamentos que cortam o DMA, por meio do destaque das discontinuidades no relevo e suas principais direções de deformação, permitiu a análise da geometria, a correlação espacial das macroestruturas entre si, bem como a possível cronologia relativa destas estruturas.

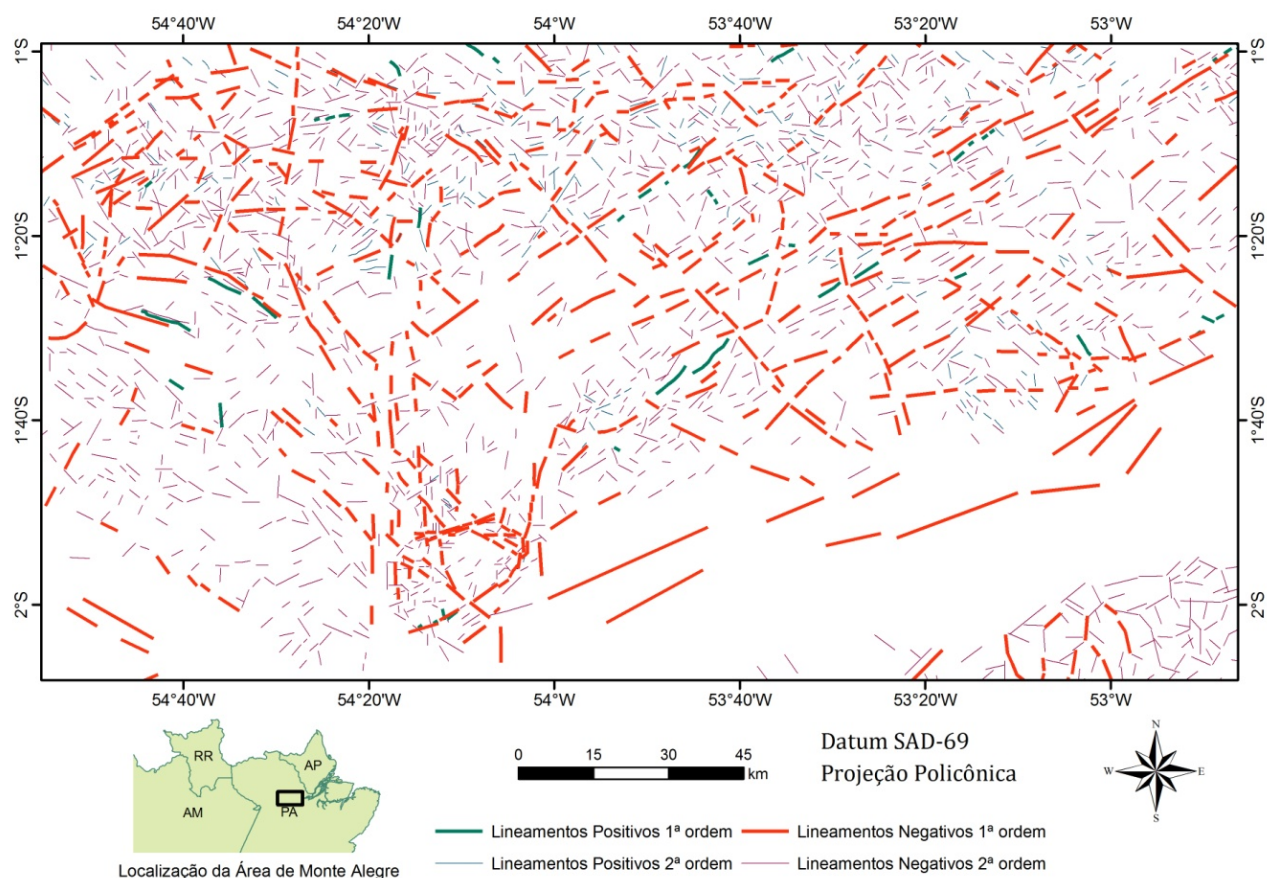


Figura 5.5: Feições lineares obtidas do modelo SRTM da região de Monte Alegre. Os traços em vermelho representam lineamentos negativos (vales) e os em verde, os positivos (cristas).

Cabe ressaltar que a área da Figura 5.5 é a área definida para a análise regional apresentada no item 1.3. Nesta abordagem procurou-se registros regionais, aqui denominados 1ª ordem (escala 1:800.000) e de detalhe 2ª ordem (1:200.000) assim chamados na Figura 5.5. Estas escalas foram definidas por apresentarem bons resultados para análise visual. O objetivo deste refinamento de detalhe foi efetuar pequenas correções no traçado e traçar lineamentos não observado na escala regional.

Após a identificação destes lineamentos em imagens SRTM, estes foram integrados às imagens aerogeofísicas (magnetometria e gravimetria) com o objetivo de relacionar e caracterizar as estruturas com informações de superfície (relevo) e de subsuperfície em diferentes profundidades (aerogeofísica).

Uma vez finalizada a identificação dos lineamentos em diferentes escalas, estes foram interpretados através de uma seleção visual, conforme a continuidade de sua direção, destacando assim o traçado das zonas de alinhamentos, ressaltados por um traço mais espesso, conforme a Figura 5.6.

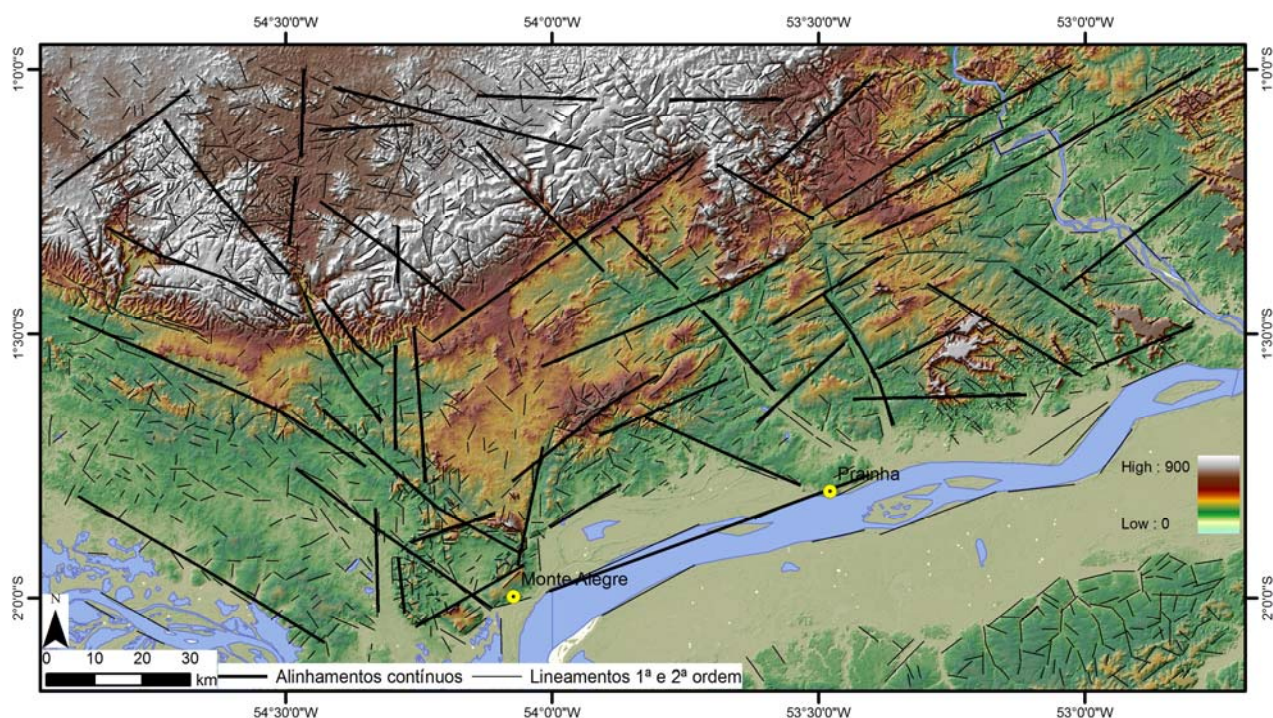


Figura 5.6: Modelo SRTM com sobreposição do mapa hipsométrico e dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem e zonas de alinhamentos contínuos interpretados.

Com base na interpretação destes lineamentos, adicionalmente, foram confeccionados diagramas de rosetas do comprimento e frequência, onde foram somadas as informações obtidas em ambas as escalas mapeadas (Figura 5.7).

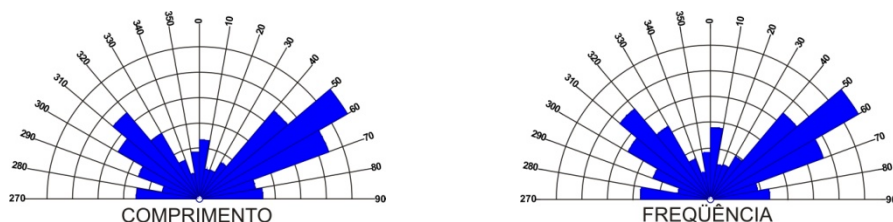


Figura 5.7: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 1 e 2. Número de medidas – 2.703.

Devido à semelhança entre os valores identificados no diagrama geral, foram da mesma forma, confeccionados diagramas separados para os lineamentos de ordem 1ª ordem (Figura 5.8) e 2ª ordem (Figura 5.9).

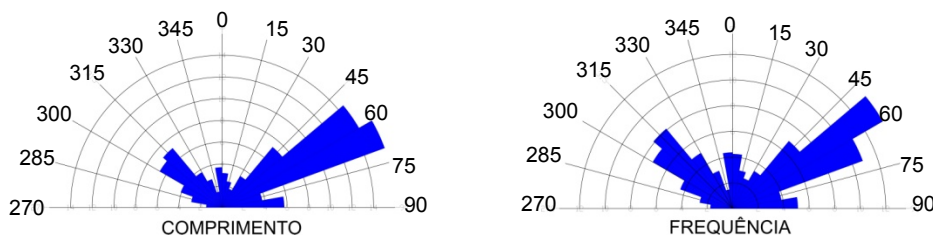


Figura 5.8: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 1. Número de medidas – 802.

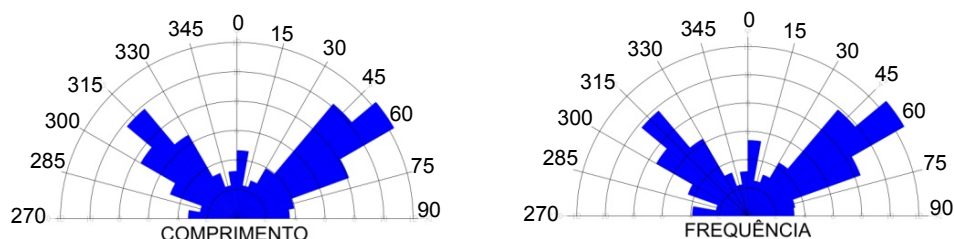


Figura 5.9: Diagrama de rosetas dos lineamentos de ordem 2. Número de medidas – 1.908.

Com esta separação, foi possível verificar diferenças entre os diagramas de 1ª e 2ª ordem. Esta diferença é mais expressiva na direção NW-SE de apresenta comprimento e frequência maior no de 2ª ordem. Isto se deve ao fato que os lineamentos são mais segmentados nesta direção que os de direção NE-SW.

Nos diagramas não foi possível ver diferenças entre as estatísticas de comprimento e de frequência, porém, de uma forma geral, as principais modas dos lineamentos encontram-se a N50-60E e a N40-50W. As direções N e E-W são pouco expressivas nesta análise.

Na tentativa de reconhecer as principais classes de direções dos lineamentos de uma maneira localizada ou por setores, foram realizados, através do programa LinAnalyst, diagramas de rosetas por células, como podem ser visualizados a partir da Figura 5.10 até a Figura 5.13.

Para a análise setorial a área foi dividida em 15 células. Este procedimento automático permitiu que a confecção de diagramas de rosetas para o comprimento e frequência fossem analisados somente com os dados de cada célula, como mostra a Figura 5.10, ou análise com base nas direções da área, com informações relativas a todas as outras células (Figura 5.11), ou seja, a média geral da frequência e comprimento da área analisada.

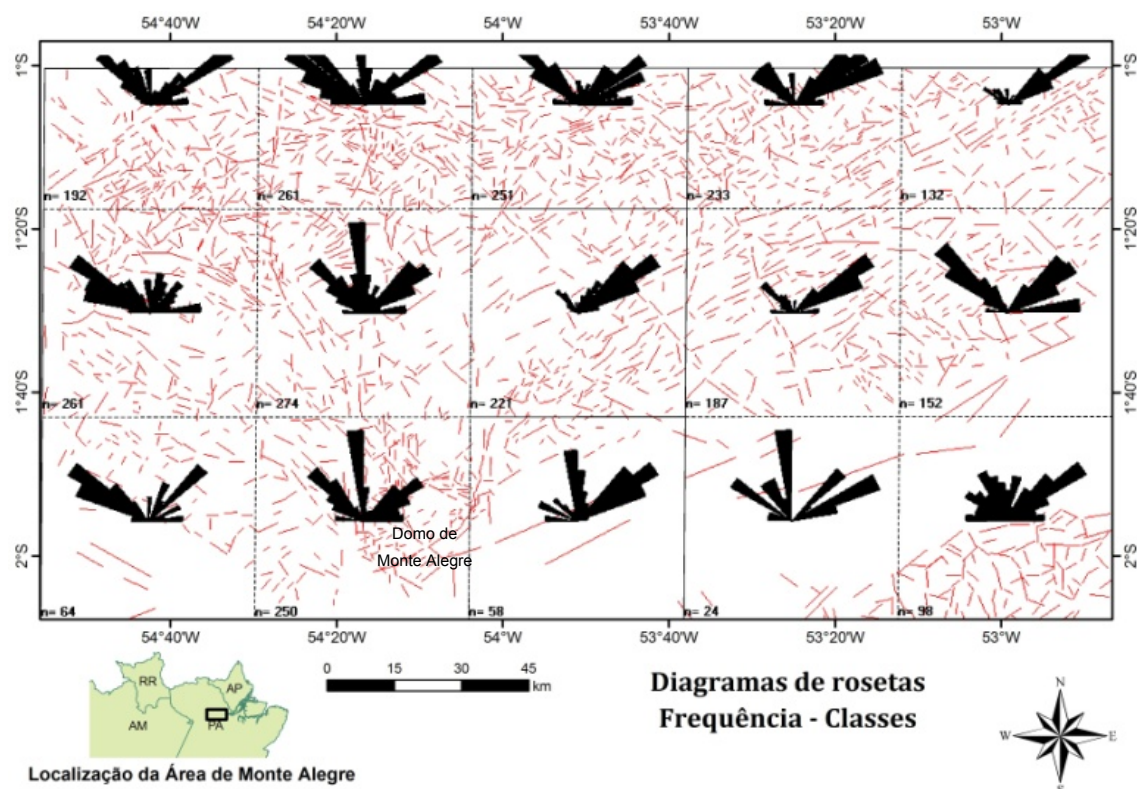


Figura 5.10: Diagramas de rosetas da frequência de direções realizado para cada setor. A figura apresenta os diagramas dos dados relativos àquela célula em específico.

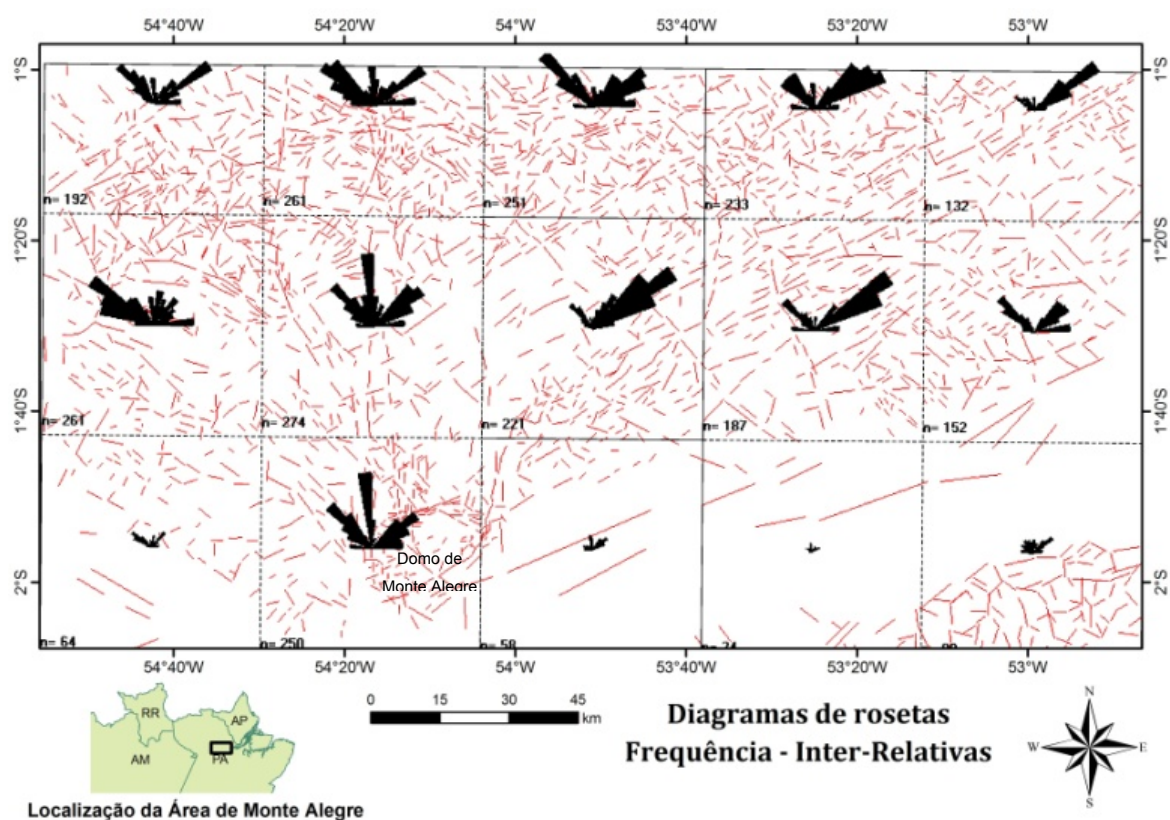


Figura 5.11: Diagramas de rosetas da frequência de direções realizado para cada setor. Os diagramas representam as direções da área de cada célula, mas com informações relativas a todas as outras células, ou seja, com pesos ponderados.

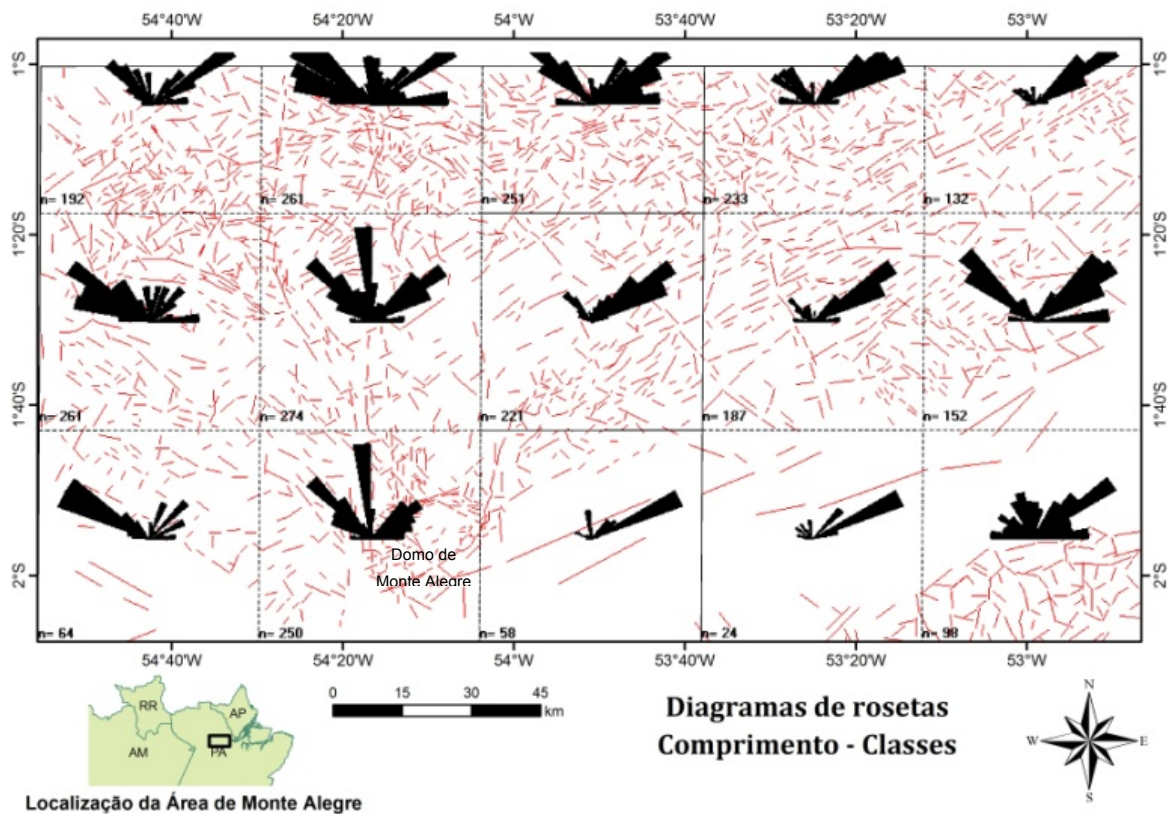


Figura 5.12: Diagramas de rosetas do comprimento de direções realizado para cada setor. Esta figura apresenta os diagramas dos dados relativos àquela célula em específico.

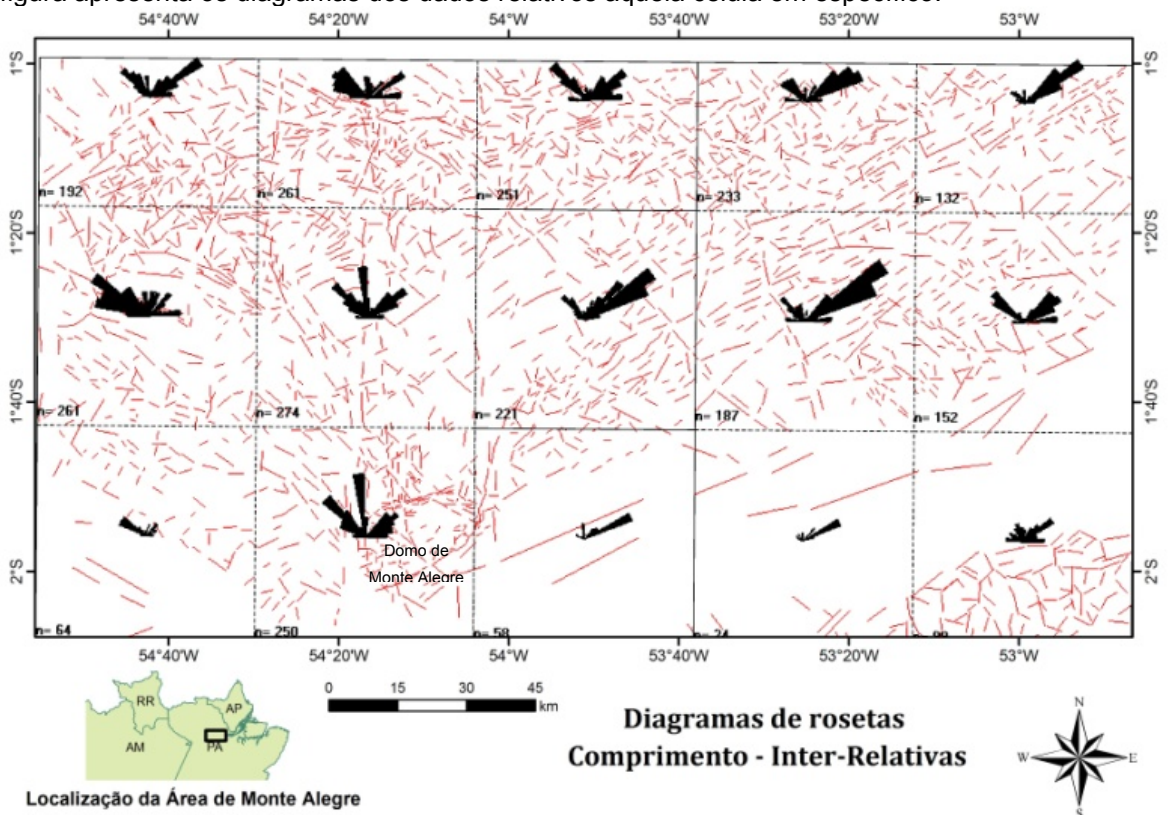


Figura 5.13: Diagramas de rosetas do comprimento de direções realizado para cada setor. Nesta figura os diagramas representam as direções da área de cada célula, mas com informações relativas a todas as outras células, ou seja com pesos ponderados.

Com a elaboração destes mapas foi possível caracterizar que, na área, estão presentes, de forma bem caracterizada, as direções de lineamentos NE-SW e NW-SE, marcadas nos diagramas regionais da Figura 5.7. Porém no cálculo realizado por setores, a direção N-S, não observada nos diagramas de roseta da Figura 5.8 e Figura 5.9, está ressaltada no alinhamento do Domo de Monte Alegre como mostra a Figura 5.14.

Essa análise permitiu identificar também que a faixa com domínio N-S, na qual encontra-se o domo, apresenta-se em uma intersecção de faixas predominantes NW-SE com faixas NE-SW, conforme pode ser visto na Figura 5.14.

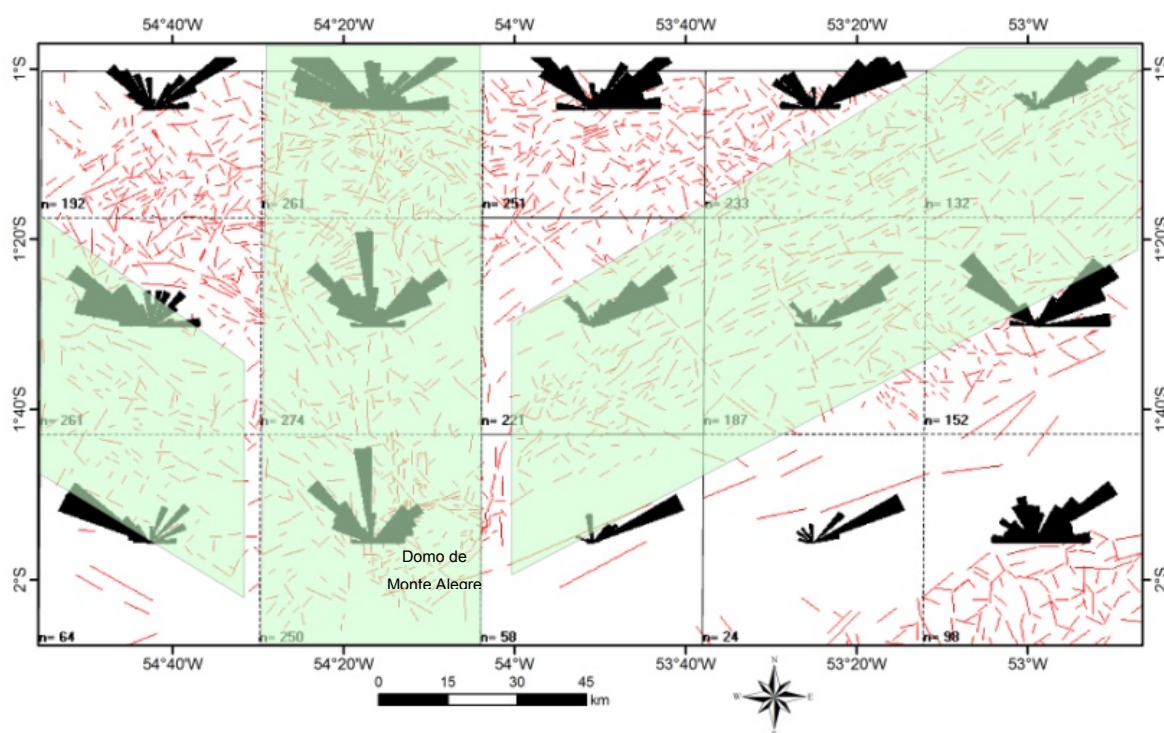


Figura 5.14: Interpretação das principais faixas (em verde) de direções presentes na área. A faixa que compreende a região do DMA encontra-se na intersecção das direções N-S, NW-SE e NE-SW.

5.2.1 Mapas de Atributos de Lineamentos

Os dados utilizados nestes mapas consistiram da somatória dos lineamentos das escalas 1:800.000 e 1:200.000, descritos no capítulo 02 (Materiais e Métodos) e apresentados na Figura 5.5. Neste caso, as regiões em branco correspondem à calha do rio Amazonas e planície do entorno.

As imagens resultantes destes mapas consistiram da interpolação numérica dos valores de comprimento e frequência, com resultados em forma de mapas de contorno, classificados com porções de isovalores, ou seja, os valores maiores, com cores quentes no mapa, correspondem às áreas onde a densidade do comprimento ou a frequência de alinhamentos é maior.

Assim foram confeccionados mapas de contornos da frequência, do comprimento e do produto da multiplicação destes dois, que representam a intensidade (Figura 5.15 e Figura 5.16). Os diagramas de rosetas que acompanham estes mapas auxiliam da visualização da estatística dos lineamentos e referem-se às informações de frequência e comprimento acumulado com os dados gerais da área.

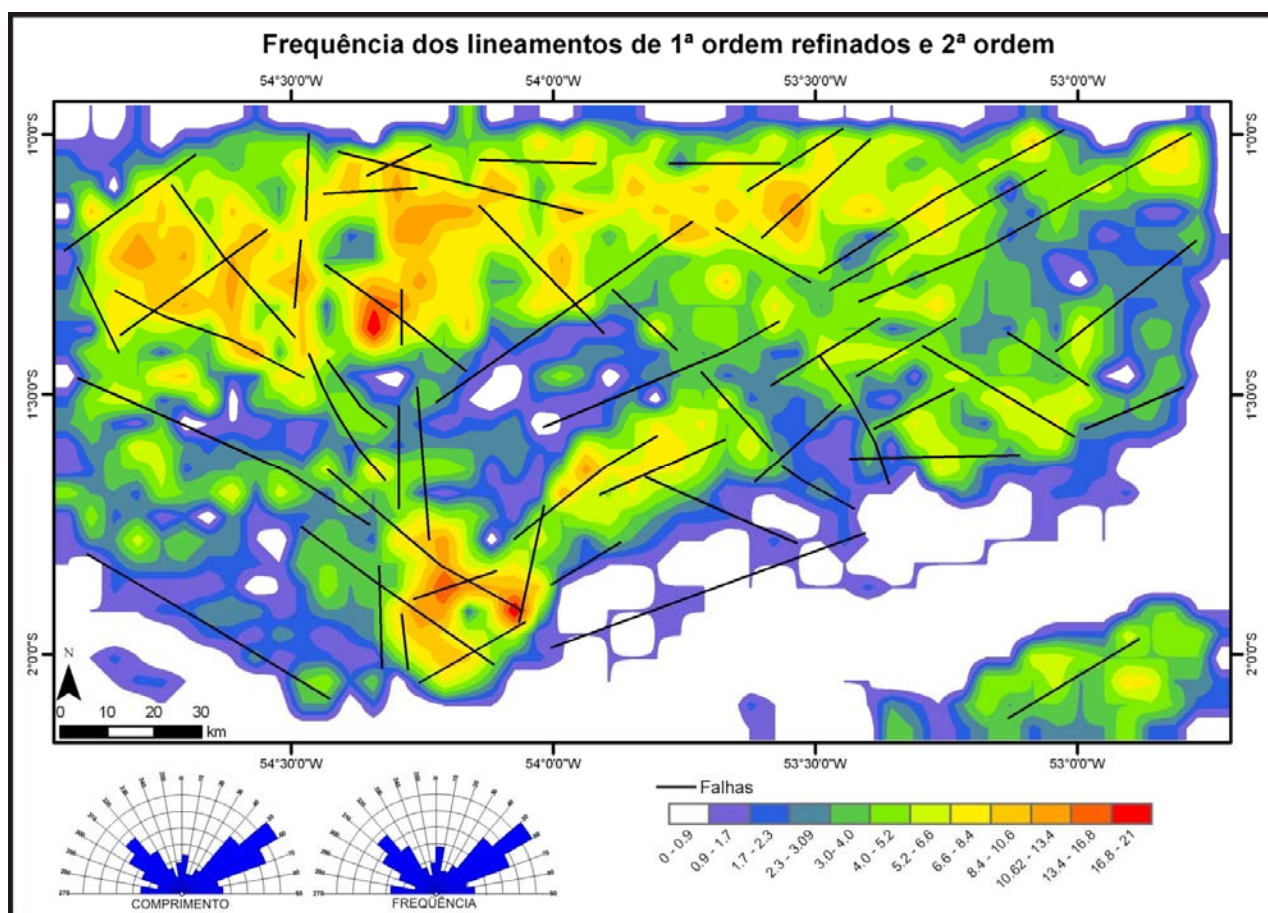


Figura 5.15: Mapa de isofrequência dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem com sobreposição do traçado dos principais alinhamentos interpretados. O intervalo das classes dos diagramas de rosetas é de 10°.

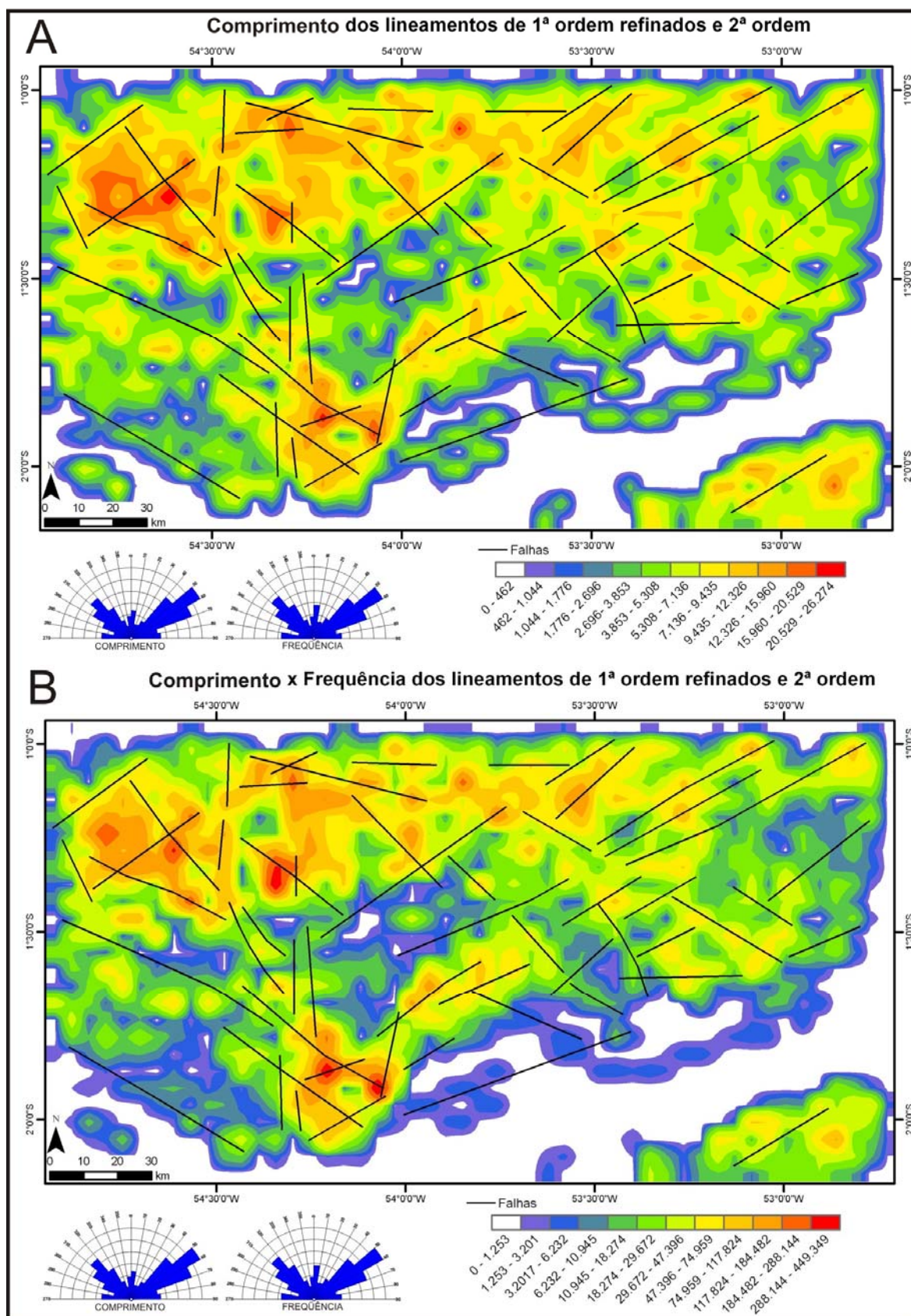


Figura 5.16: Mapas de contorno da somatória dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem com sobreposição do traçado das zonas de falhas. A) Mapa de isocomprimento e o respectivo diagrama de roseta e B) Mapa da frequência multiplicado pelo comprimento e o respectivo diagrama de roseta. O intervalo das classes dos diagramas de rosetas é de 10°.

Segundo De Freitas (2005) os modelos analíticos de lineamentos, levam em consideração apenas segmentos retilíneos, constituídos por dois pontos extremos, ou vários segmentos retilíneos associados.

Por meio da análise destes mapas foi possível destacar que os valores de maiores frequência dos lineamentos concentram-se na porção norte (região de exposição de rochas do Grupo Trombetas e embasamento) e também na região do Domo de Monte Alegre (porção sul). Para estas regiões os comprimentos dos lineamentos também são maiores.

Após esta primeira análise, o conjunto de lineamentos foi separado em 4 classes azimutais no intuito de visualizar separadamente as direções N-S, E-W, NE-SW e NW-SE. Nesta etapa foram aplicados filtros com azimutes entre 22,5 - 67,5 que representam as direções NE; 67,5 - 112,5 para as direções EW; 112,5 - 157,5 para as direções NW e 157,5 - 202,5 para as direções NS.

A partir desta separação, foram gerados os mapas de frequência e de comprimento (Figura 5.15), bem como o resultado entre a multiplicação de ambos (Figura 5.16).

Os mapas da Figura 5.17 representam, na primeira linha, a distribuição dos lineamentos separados pelas classes azimutais, na segunda linha, os mapas de frequência, na terceira linha os comprimentos acumulados e por fim o produto da multiplicação destes últimos.

Nota-se nestes mapas que a maior concentração da frequência e comprimento dos lineamentos na direção NW-SE, fato já observado na classificação por diagramas de rosetas, ocorre nas porções oeste e norte da área.

Essa mesma observação vale para a direção NE-SW onde as maiores concentrações ocorrem na porção norte e nordeste e para os lineamentos de direção N-S que encontram-se, principalmente, na faixa da região do Domo de Monte Alegre. Lineamentos de direção E-W concentram-se na porção norte, tanto para os maiores comprimentos, quanto para sua frequência.

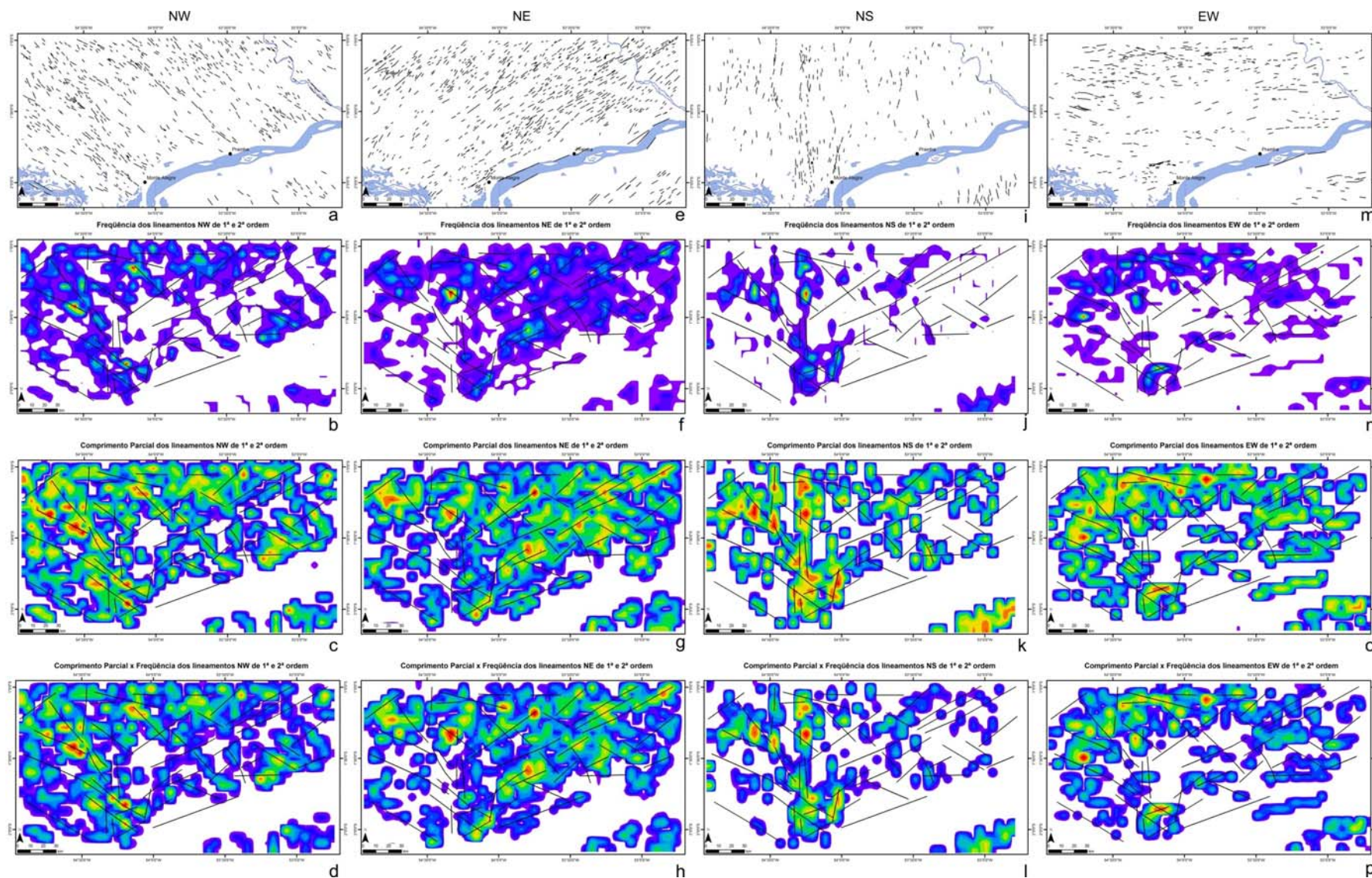


Figura 5.17: Mapas dos lineamentos de 1ª e 2ª ordem separado por classes azimutais seguidos dos mapas respectivos do contorno da frequência, comprimento e da frequência multiplicada pelo comprimento.

5.3 ANÁLISE EM FOTOGRAFIAS AÉREAS

Após a análise de lineamentos, realizada com base em modelos SRTM, cujo enfoque foi regional, procedeu-se uma segunda análise de maior detalhe, onde foi possível visualizar traços menores não captados em imagens regionais (SRTM). Para tanto foram utilizadas cópias de fotos aéreas da Força Aérea Brasileira de 1966 na escala 1:8.000, que embora não apresentem boas resoluções comparadas às obtidas atualmente, permitiram a visualização das direções dos principais lineamentos superficiais de relevo, como observadas na Figura 5.18.

As fotos foram digitalizadas e retificadas segundo dados planimétricos como estradas e drenagens da CPRM (2008)

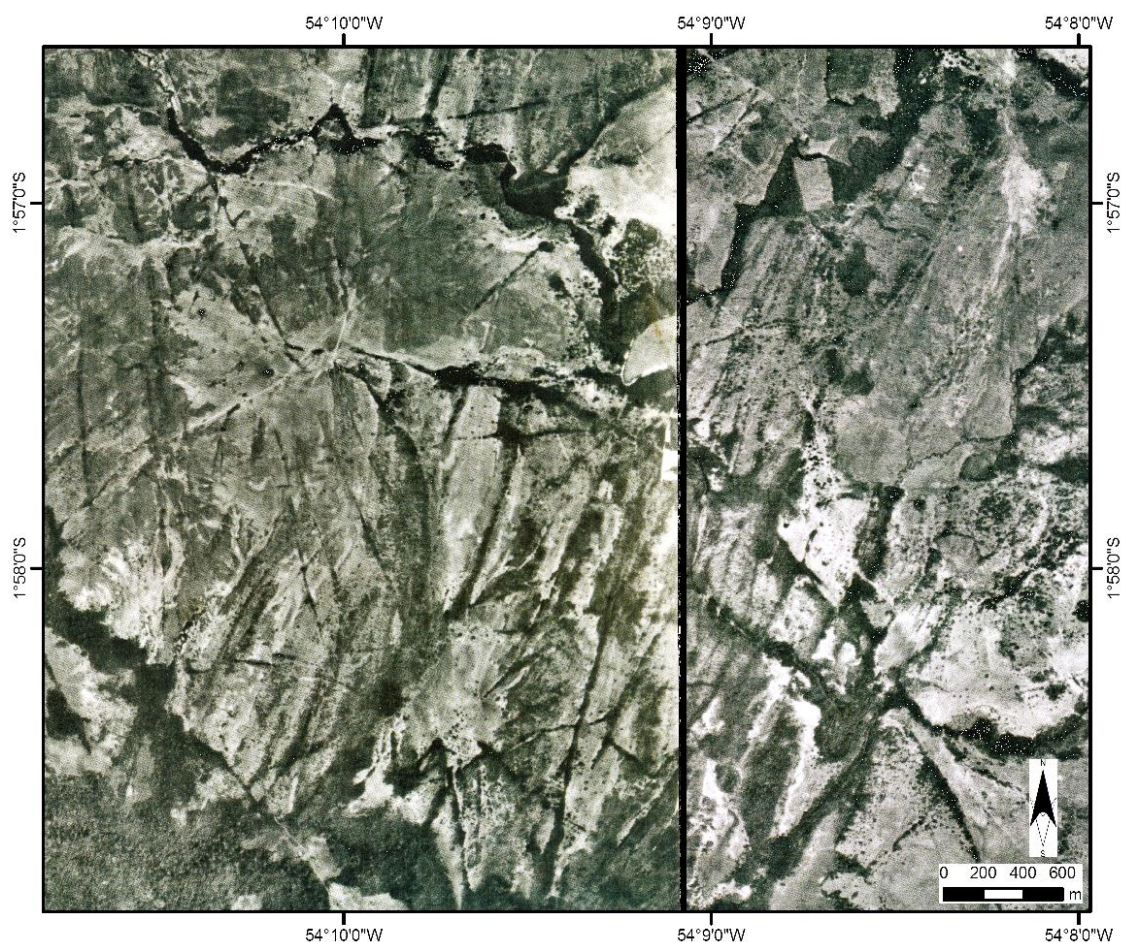


Figura 5.18: Detalhe da foto aérea (escala 1:8.000) da região central do Domo de Monte Alegre.

A abrangência da área de interpretação das fotos aéreas compreende apenas o Domo de Monte Alegre, conforme polígono em vermelho apresentada na Figura 5.19. A área retangular em preto representa, por sua vez, a região

interpretada do modelo SRTM.

Os pares de fotos foram interpretados com estereoscópio de espelho e, nesta fase, procurou-se reconhecer os lineamentos positivos e negativos (Figura 5.19), as quebras de relevo (Figura 5.20) e possíveis direções de acamamento.

Após o reconhecimento destes lineamentos de relevo, estes foram representados por traços contínuos que tiveram como princípio a continuidade e persistência dos lineamentos segundo o mesmo método utilizado na análise da escala regional.

A configuração geral dos lineamentos de relevo na região do Domo de Monte Alegre pode, então, ser observada na Figura 5.19

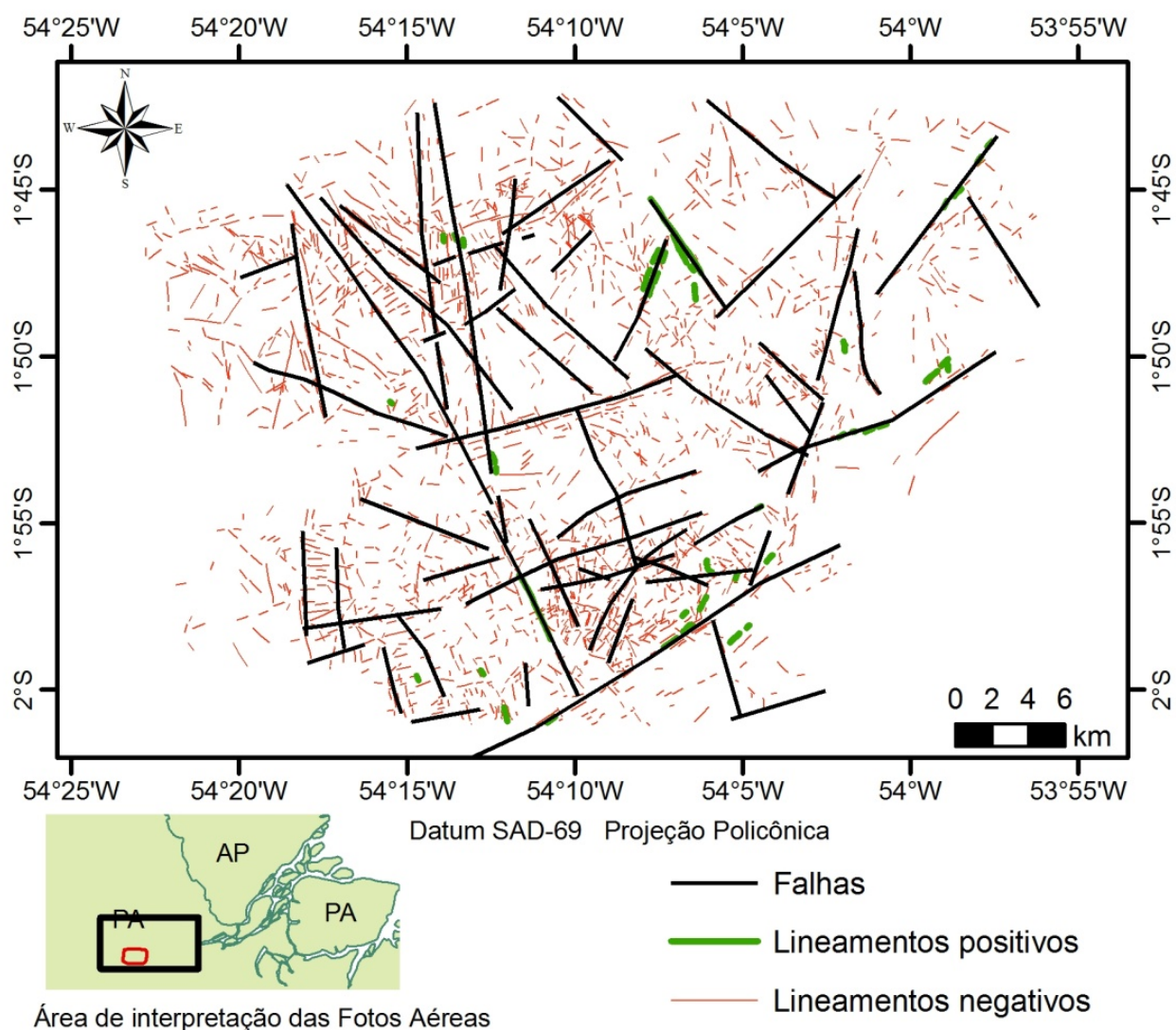


Figura 5.19: Lineamentos positivos e negativos extraídos a partir das fotos aéreas escala 1:8.000 com a interpretação dos lineamentos de relevo.

Ainda nesta análise foram traçadas as quebras de relevo positivas e negativas, conforme apresenta a Figura 5.20, na qual fica evidente o controle do relevo, concordantes com as direções identificadas através dos lineamentos.

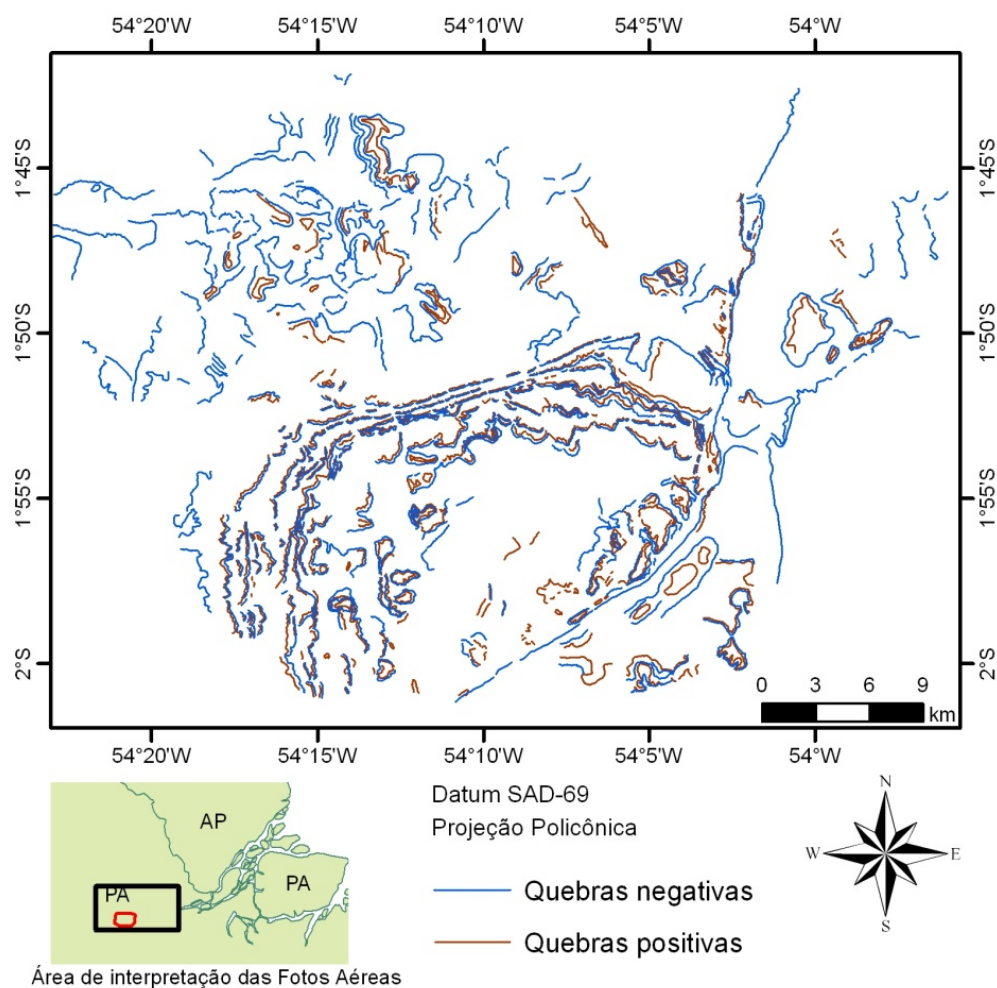


Figura 5.20: Disposição da interpretação das quebras positivas e negativas de relevo.

Seguindo o método de confecção dos diagramas de rosetas dos lineamentos do modelo SRTM, os lineamentos identificados nas fotografias aéreas receberam o mesmo tratamento.

Por tratar-se de uma área de maior detalhe, esta apresentou características diferentes das encontradas em análise regional, identificando-se um delineamento mais desorganizado, porém mesmo assim com regiões estruturadas, como por exemplo, a borda norte do DMA com lineamentos na direção ENE-WSW e outras.

Para obter maior detalhe por região analisada, o programa LinAnalyst dividiu a área entre 24 células de análise, como é mostrado da Figura 5.21 até a Figura 5.25.

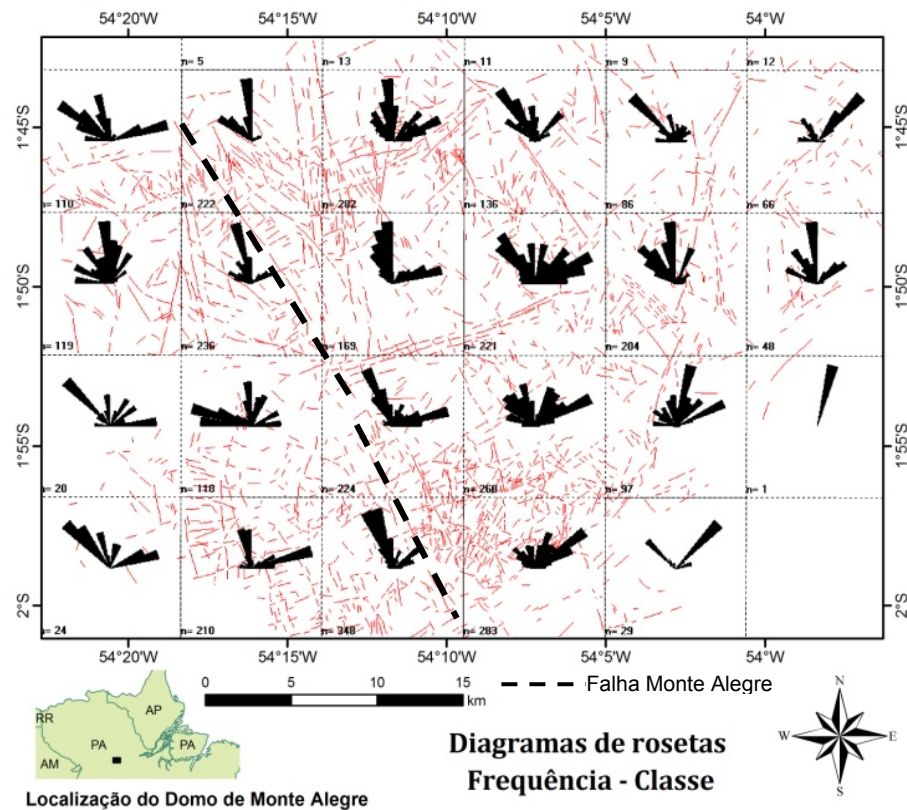


Figura 5.21: Diagramas de rosetas da frequência de direção. A figura apresenta os diagramas dos dados relativos àquela célula em específico.

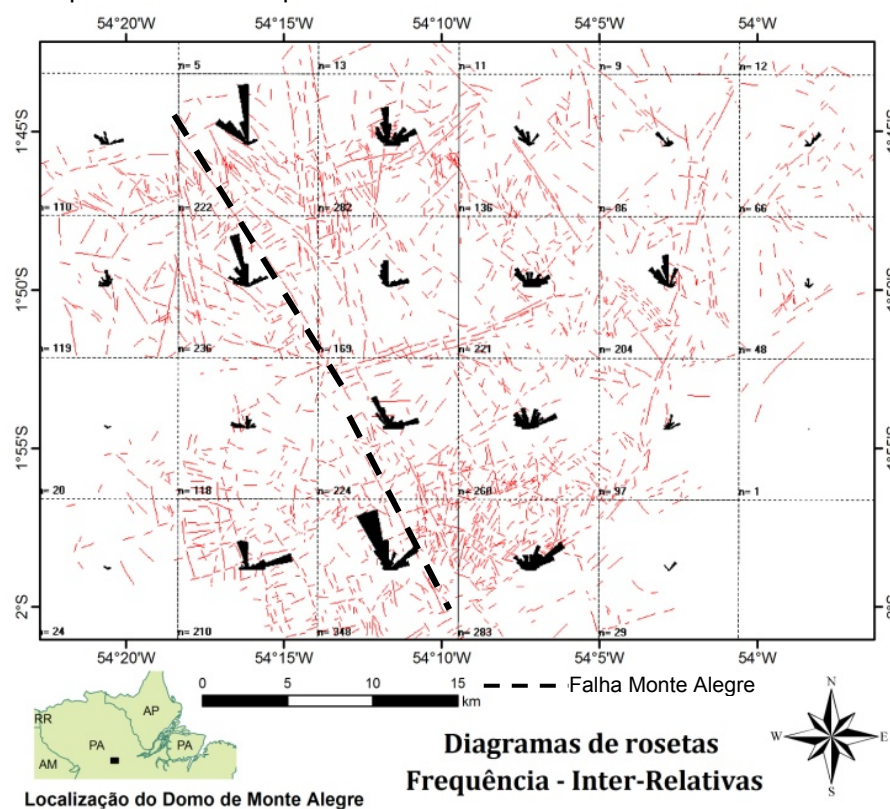


Figura 5.22: Diagramas de rosetas da frequência de direção. Nesta figura os diagramas representam as direções da área de cada célula, mas com informações relativas a todas as outras células.

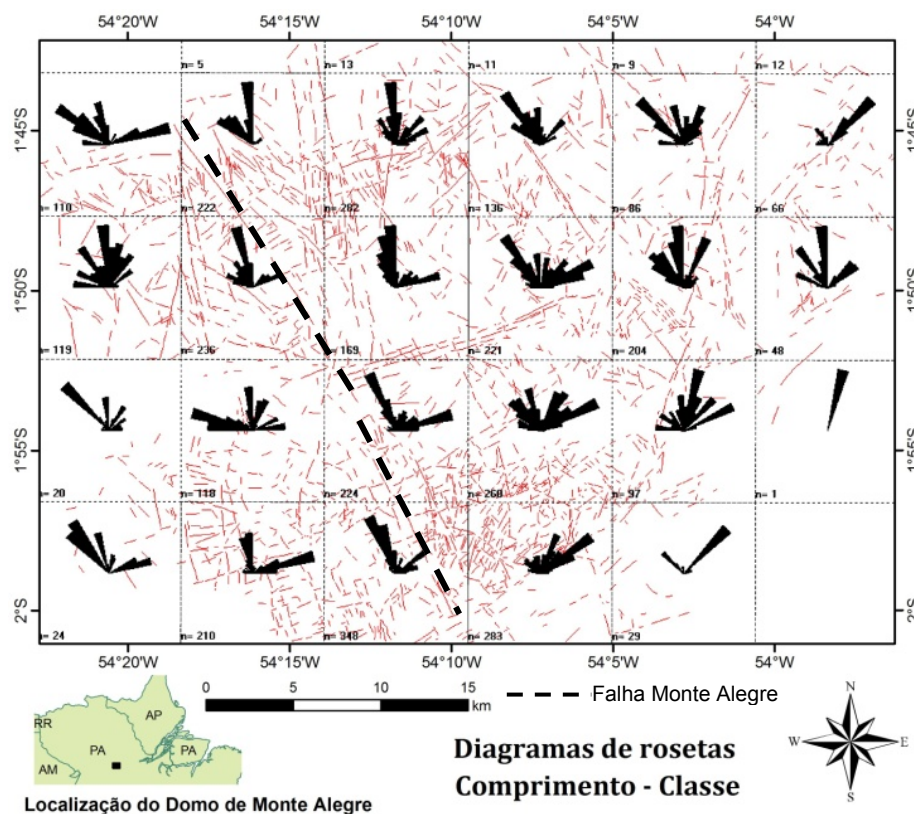


Figura 5.23: Diagramas de rosetas do comprimento. Na figura os diagramas representam as direções da área de cada célula, mas com informações relativas a todas as outras células.

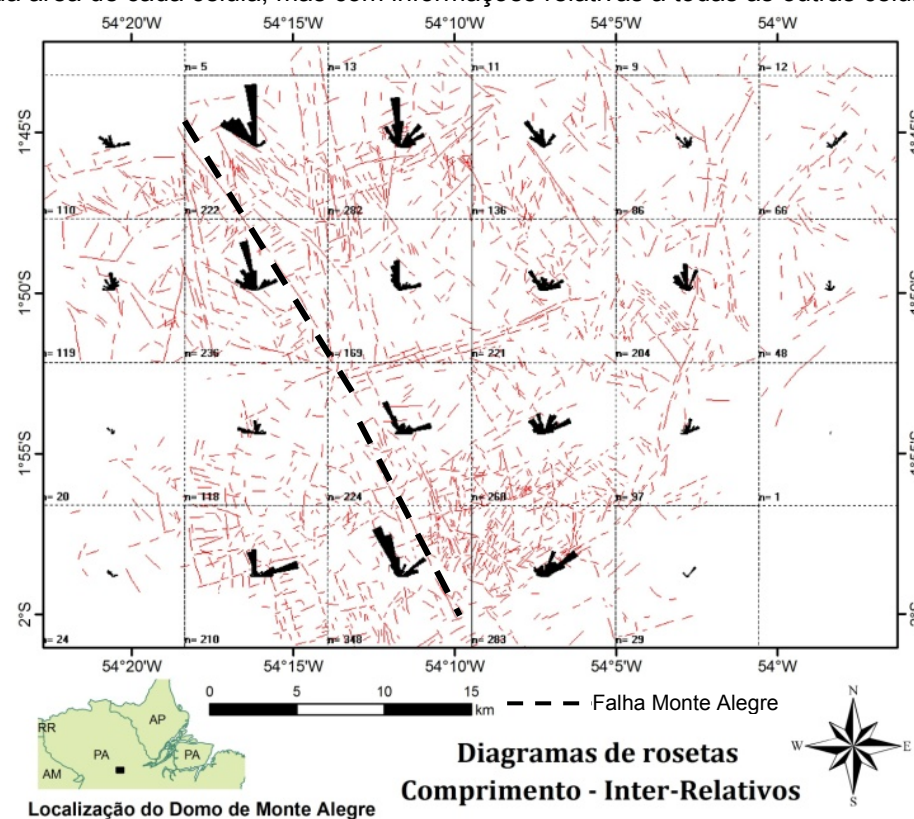


Figura 5.24: Diagramas de rosetas do comprimento. A figura apresenta os diagramas dos dados relativos àquela célula em específico.

Ainda que presente a direção N-S, os diagramas dos lineamentos inter-relativos destes mapas revelou a predominância da direção N20-30W, conforme apresenta a faixa em verde da Figura 5.25.

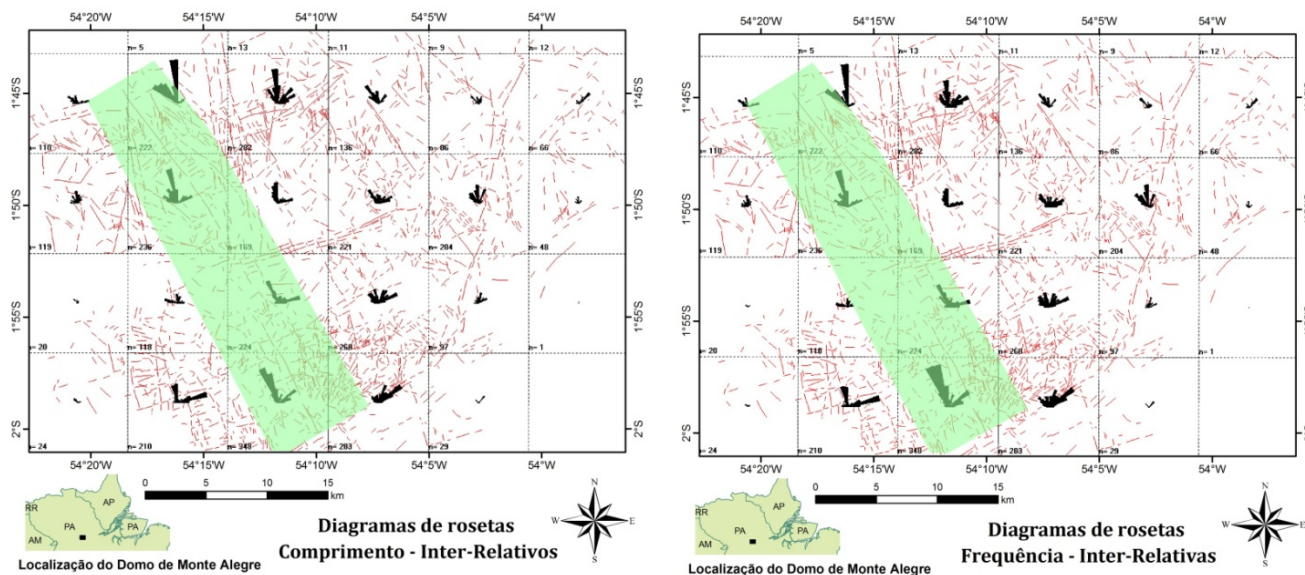


Figura 5.25: Zona de falha com direção N20-30W.

Nos levantamentos de campo foram identificados dois afloramentos (MA-09 e MA-32) com falhas mapeadas e preenchidas por elementos radiométricos, medidos por meio de gamaespectrômetro, na região central do DMA. Esta falha apresenta a mesma direção dos lineamentos obtidos em fotos aéreas (N20-30W) que foi, neste trabalho, denominada de Falha de Monte Alegre (Figura 5.26).

Tal como realizado anteriormente para os lineamentos regionais, foram construídos mapas de isovalores dos lineamentos das fotos aéreas.

Estes mapas e diagramas revelaram para o DMA uma direção preferencial, indicada tanto pela frequência, quanto pelo comprimento N-N20W/S-SE, bem como secundariamente as direções N-S, NW/SE e NE/SW.

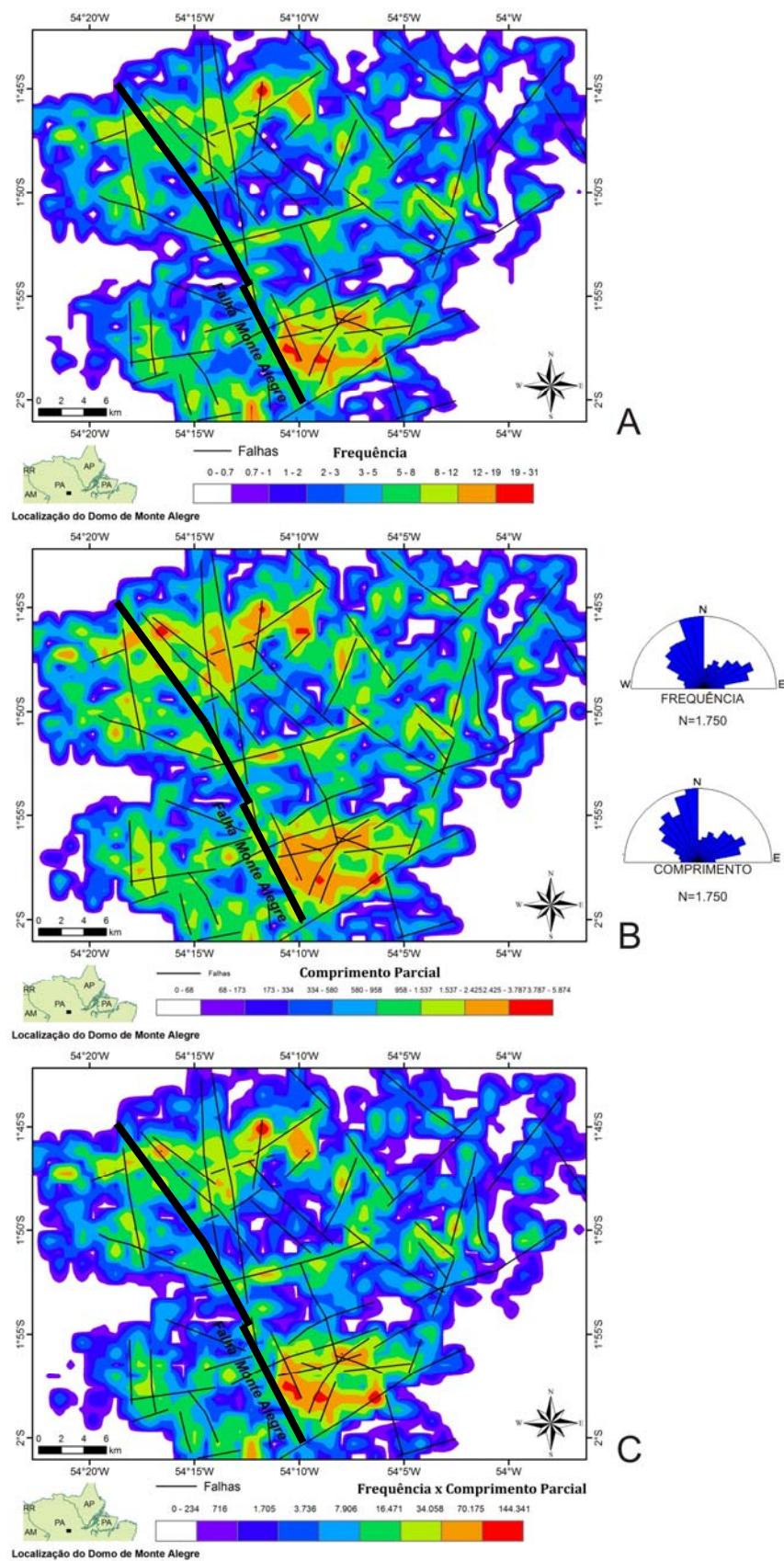


Figura 5.26: Mapas de contorno dos lineamentos extraídos das fotografias aéreas com sobreposição da interpretação dos lineamentos e a Falha de Monte Alegre N20-30W/SE. A) Mapa da Frequência; B) Mapa do Comprimento Acumulado; C) Mapa da frequência multiplicado pelo comprimento.

A Figura 5.27 apresenta a síntese do mapeamento morfoestrutural regional, realizado principalmente na margem norte do rio Amazonas e que compreende o Domo de Monte Alegre.

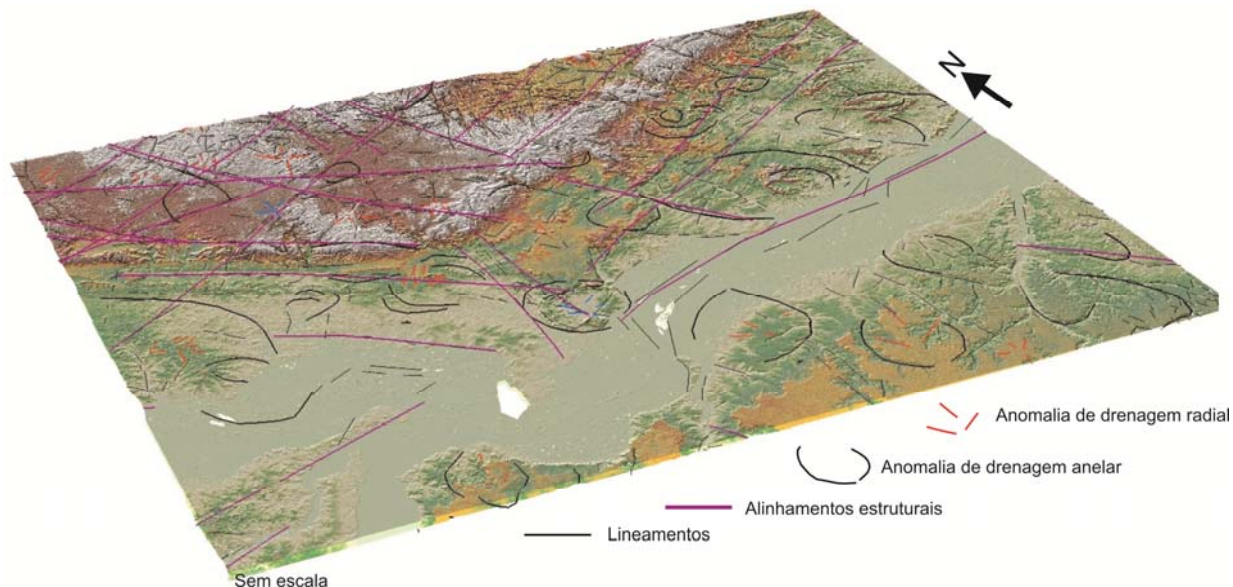


Figura 5.27: Síntese morfoestrutural (vista ortogonal) com base na drenagem e lineamentos de relevo obtido através de imagens orbitais e fotos aéreas. Os alinhamentos estruturais representam a interpretação destes lineamentos identificados.

6 GEOFÍSICA

Neste capítulo serão apresentados produtos derivados da interpretação dos dados magnéticos e gravimétricos em escala regional (aerogeofísica) e dados de levantamento geofísico terrestre de susceptibilidade magnética e gama-espectrometria. Os dados aerogeofísicos foram processados e interpretados pelos integrantes do projeto CATEA através da base de dados fornecidas pela Petrobras.

6.1 GEOFÍSICA REGIONAL

No contexto do projeto CATEA foram realizados processamentos e interpretações qualitativas dos dados magnéticos e gravimétricos por Bongioio, (2011). A aplicação de filtros nestes dados geofísicos e processamento das imagens não fazem parte do escopo desta tese e assim é apresentado apenas o resultado da interpretação destes mapas.

Esta análise regional serviu como base para comparar os lineamentos obtidos através da geofísica com os observados em superfície.

6.1.1 Magnetometria

O mapa magnético residual (Figura 6.1) aqui apresentado foi processado a partir de uma base de dados fornecida pela Petrobras. A partir deste mapa residual, foram aplicados filtros como gradiente horizontal total, de inclinação do sinal analítico e amplitude do sinal analítico por (BONGIOLO, 2011).

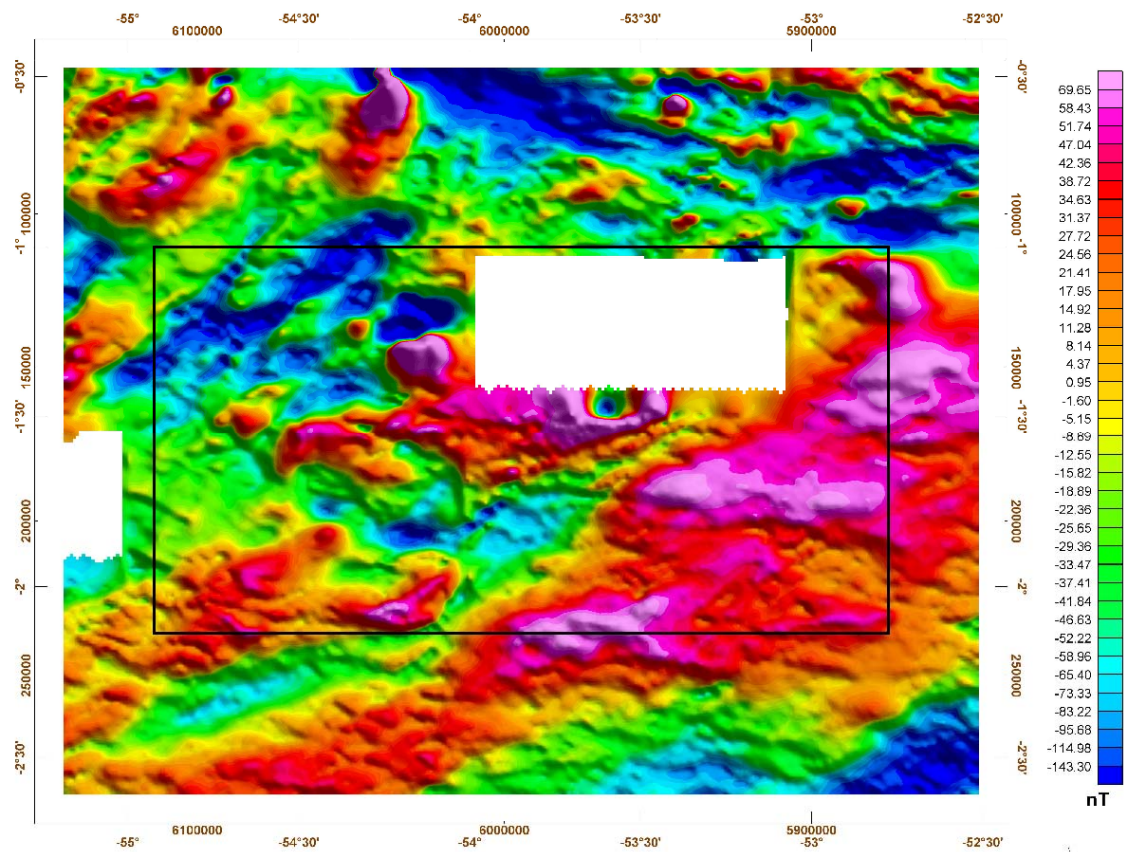


Figura 6.1: Mapa magnético residual da região de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011). A área em preto refere-se à área regional apresentada no capítulo 1.3.

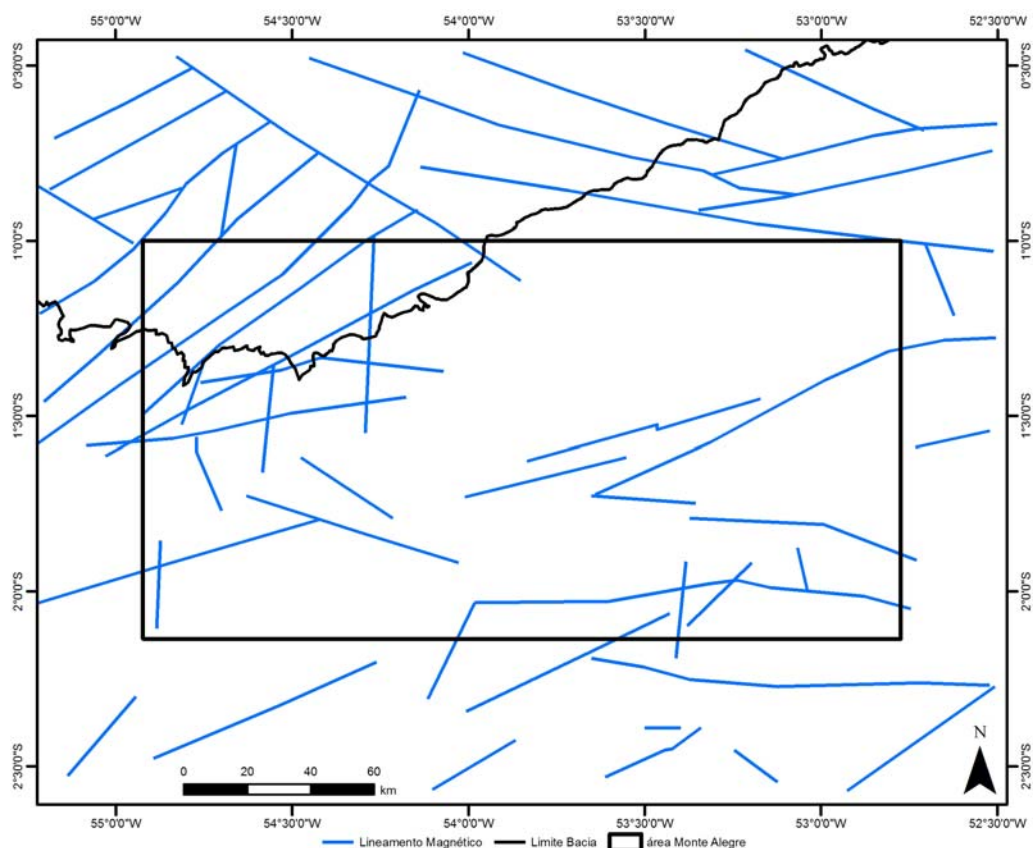


Figura 6.2: Mapa de interpretação magnética da área de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011).

6.1.2 Gravimetria

Os dados processados do mapa gravimétrico Bouguer não englobam a totalidade da área de Monte Alegre, porém permitem reconhecer dois altos gravimétricos sendo que o localizado na porção SW da área em destaque preto, corresponde ao Domo de Monte Alegre (Figura 6.4).

A partir da aplicação de métodos de realce de anomalias de campos potenciais, como mencionado anteriormente esta aplicação de métodos e filtros, não fazem parte do escopo desta tese, foram produzidos mapas gravimétricos que serviram de base para a interpretação do traçado de lineamentos gravimétricos (Figura 6.4).

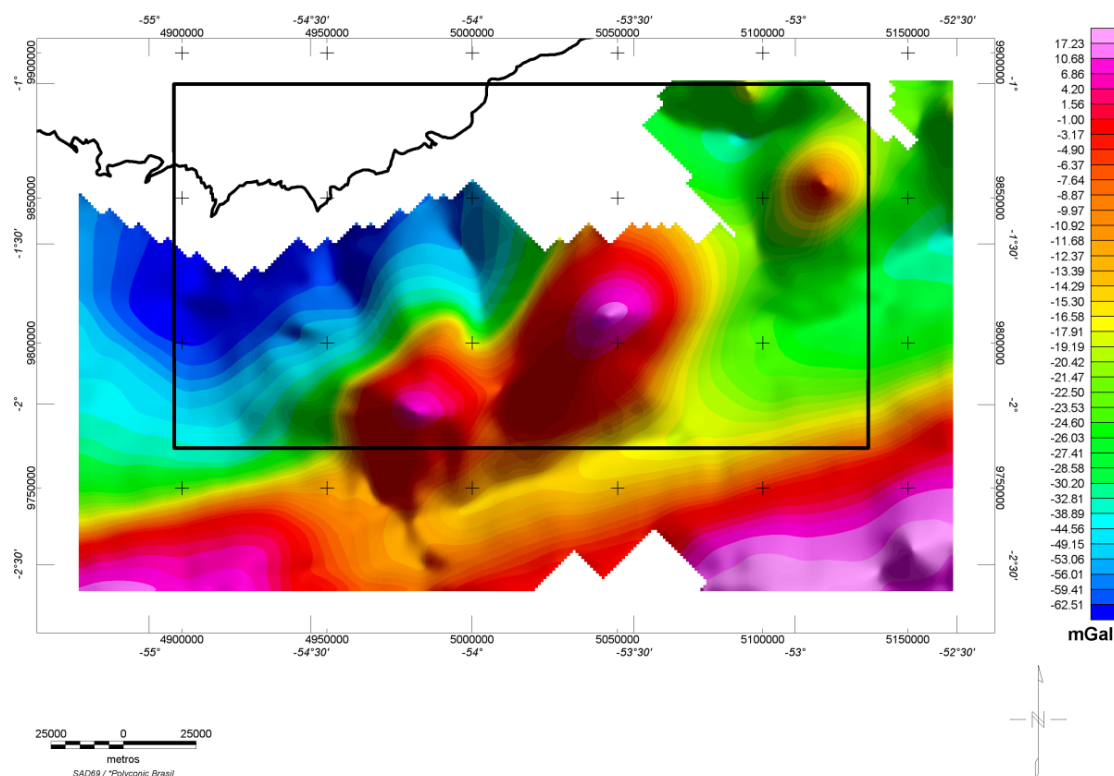


Figura 6.3: Mapa gravimétrico Bouguer da região de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011), com destaque a área de estudo e o limite da Bacia do Amazonas em preto.

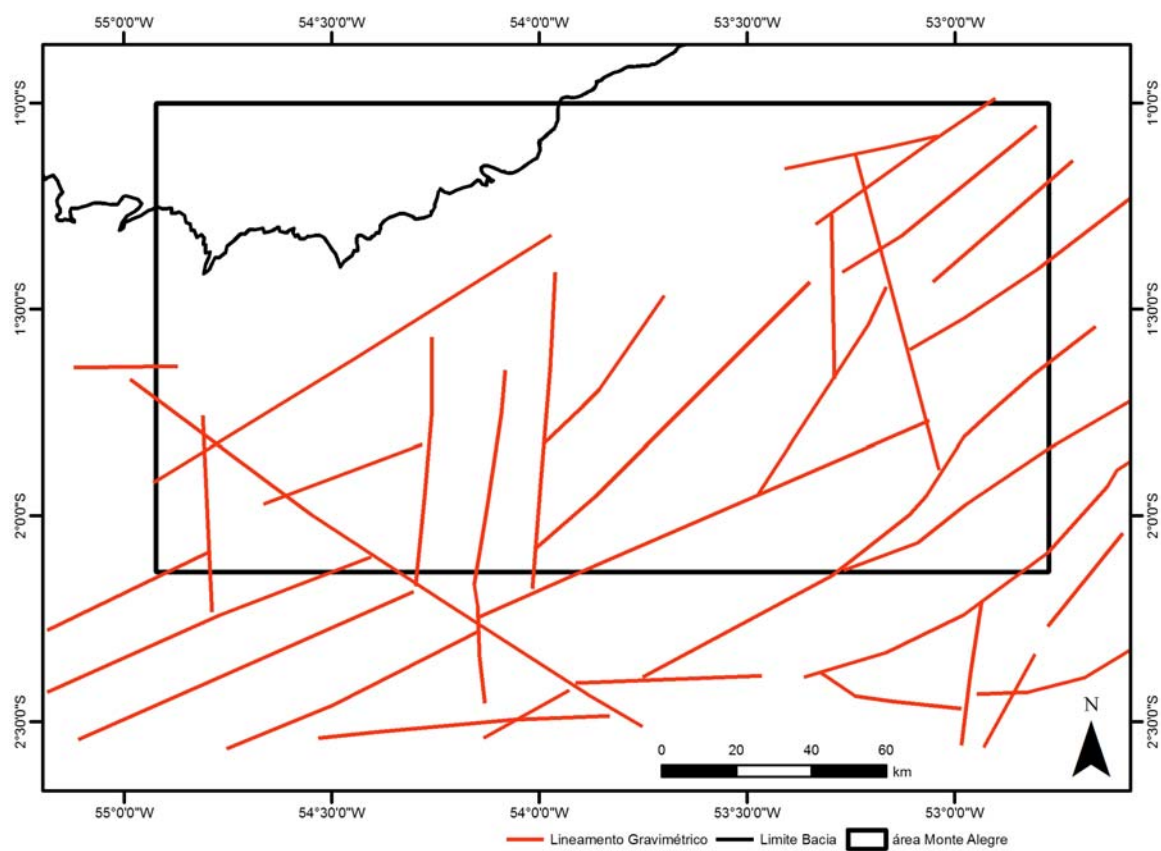


Figura 6.4: Lineamentos interpretados a partir do mapa gravimétrico Bouguer da região de Monte Alegre (BONGIOLO, 2011).

Os lineamentos interpretados tanto da magnetometria, quanto da gravimetria, foram comparados aos lineamentos obtidos por imagens orbitais (SRTM). O mapa resultante da integração destes lineamentos foi construído segundo uma rotina de etapas. Para isto foram sobrepostas as principais zonas de falhas interpretadas a partir dos lineamentos extraídos em modelo SRTM, com os lineamentos magnetométricos e gravimétricos. Onde havia a coincidência do traçado dos lineamentos geofísicos com o do SRTM, estes foram suprimidos resultando num traço denominado Integração SRTM-Geofísica.

A Figura 6.5 apresenta acima, os limites dos levantamentos geofísicos, cujo polígono hachurado em azul representa a ausência de dados gravimétricos e em rosa os dados magnetométricos. Abaixo encontra-se o mapa integrado dos lineamentos de Monte Alegre.

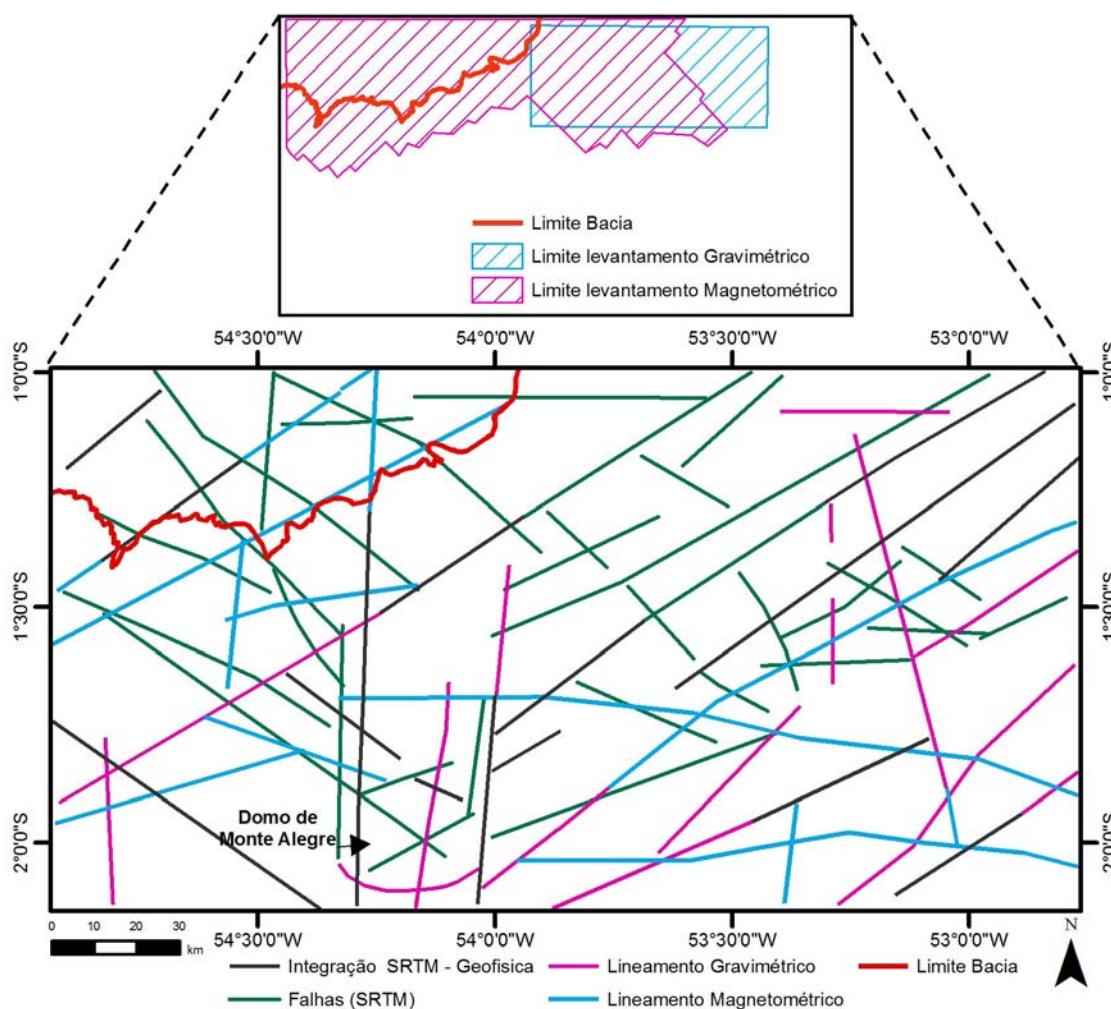


Figura 6.5: Mapa de integração das interpretações das principais zonas de falhas identificadas em relevo com o traçado dos lineamentos geofísicos. Fonte dos lineamentos geofísicos (BONGIOLO, 2011).

Nesta figura pode se observar *trends* NE-SW, de forma mais dispersa, *trends* NW-SE e na região do Domo de Monte Alegre um cruzamento de direções N-S, NE-SW e NW-SE.

Esta integração de dados de diferentes bases de informações revelou concordância entre direções obtidas na geofísica (profundidade) com os observados em superfície, principalmente nas direções NE-SW que pode ser traduzido que estas direções de fraqueza são profundas e seu traçado na superfície pode ser produto de reativações de falhas antigas do embasamento.

6.2 GEOFÍSICA TERRESTRE

Durante as etapas de campo realizadas na região de Monte Alegre, em cada ponto, foram adquiridos dados de susceptibilidade magnética e dados radiométricos (gama-espectrometria), os quais foram armazenados em tabela (

Tabela 6.1) com informações relativas ao nº do afloramento, coordenada, litotipo, susceptibilidade magnética (k), contagem total (CT), Potássio (K), Urânio (eU) e Tório (eTh).

Tabela 6.1: Dados de entrada do levantamento geofísico terrestre realizado ao longo das etapas de campo na região de Monte Alegre.

Ponto	x	y	k1	k2	k3	Litotipo	CT	K	eU	eTh
MA 01	824692	9785206	0.08	0.07	0.05	siltito	430.2	59.3	43.8	40.6
MA 02	824005	9786718	0.05	0.06	0.05	siltito	430	59.5	45	40.8
MA 02a	824005	9786719	0.18	0.17	0.18	óxido de ferro	449	60.5	48	40
MA 03c	827072	9789053	0.1	0.09	0.1	siltito	223	32.0	24	49
MA 04	828063	9791307	0.03	0.02	0.03	arenito	100	13.0	11	7.5
MA 06	828356	9792843	0.03	0.02	0.02	siltito	384	46.0	36	32
MA 06a	828356	9792844	0.14	0.15	0.15	siltito	418	54.0	44	40

6.3 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

De acordo com Sheriff (1999), a susceptibilidade magnética (k) é uma medida do grau segundo o qual uma determinada substância pode ser magnetizada e representa a razão entre a magnetização (momento magnético por unidade de volume, ou uma medida do efeito causado no campo magnético) por um campo magnético indutor (H), ou seja $k=M/H$.

Os dados de susceptibilidade magnética foram adquiridos por um indicador de **k**, modelo Kappameter KT-5, fabricação Geofyzika (República

Tchea), pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, em unidades $\text{SI} \times 10^{-3}$.

Foram feitas 77 medidas de susceptibilidade magnética, distribuídas em 51 pontos descritos. Somente no ponto MA-21 onde se localiza o afloramento da frente de lavra da pedreira Três Bocas, foi realizado levantamento sistemático de detalhe onde foram adquiridas 78 medidas que serão abordadas em separado.

A medida é realizada por meio do susceptibilímetro que é encostado diretamente na rocha, obtendo-se o valor médio de três medidas consecutivas, com leitura direta no visor do aparelho (Figura 6.6).

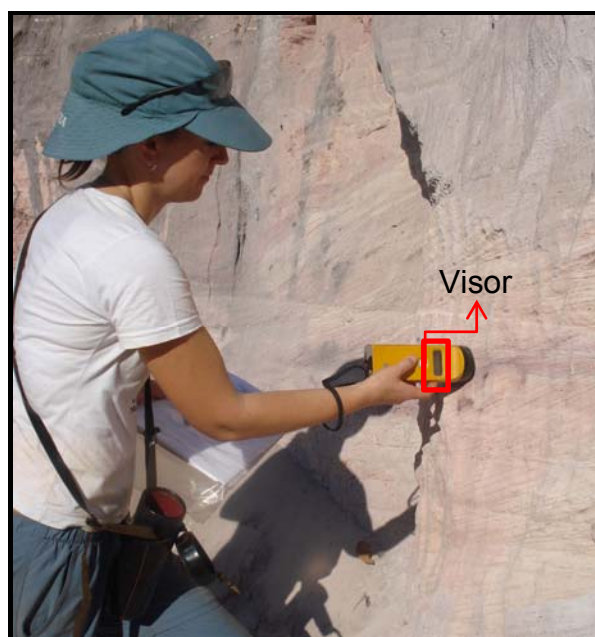


Figura 6.6: Medida da susceptibilidade magnética em campo.

Estes dados foram transformados em malhas regulares de 250x250 metros, pelo método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974), no programa Oasis Montaj - Geosoft™, programa de processamento geofísico.

O mapa final gerado por este processo é visto na Figura 6.7 onde se observam valores elevados no Sul, Oeste e Norte da área de estudo. Tais valores, superiores a $7 \times 10^{-3} \text{ SI}$, correspondem a rochas básicas, gabros e dioritos, vinculadas ao magmatismo Penatecaua. É interessante observar que o trato anômalo meridional parece estar controlado por falhas nas direções NNW e NE. Os baixos valores de k refletem as rochas sedimentares das formações Ererê, Barreirinha, Curiri, Oriximiná, Faro e Monte Alegre.

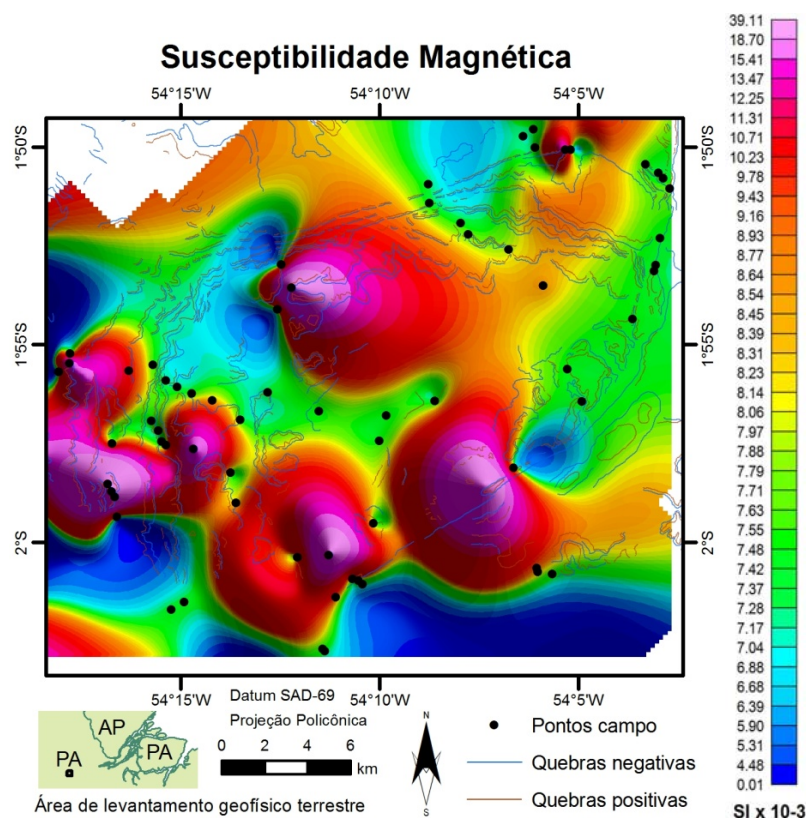


Figura 6.7: Mapa de susceptibilidade magnética e interpretação das quebras de relevo realizada a partir de fotografias aéreas. A área delimitada na figura engloba apenas os pontos levantados em campo.

Na Pedreira Três Bocas, o levantamento detalhado de valores de susceptibilidade magnética nos afloramentos da bancadas permitiu a confecção de quatro perfis os quais podem ser visualizados na

Figura 6.8.

Para a bancada A (ver

Figura 6.8), foram levantadas duas linhas. Na linha 1 foram obtidas 7 leituras e na linha 2, apenas 3 leituras. Para estes pontos as médias de k das rochas básicas são, respectivamente, $32,4$ e $29,8 \times 10^{-3}$ SI.

Já na bancada C foram realizados dois perfis: um horizontal e outro vertical. No primeiro foram realizadas 52 leituras, cujos valores médios chegaram a $35,1 \times 10^{-3}$ SI, enquanto que na seção vertical foram registradas 7 leituras com valores médios de $29,0 \times 10^{-3}$ SI.

Por tratar-se de uma rocha ígnea encaixante, para o topo observa-se o contato desta com siltito, onde obteve a média de $0,21 \times 10^{-3}$ SI, revelando o forte contraste de susceptibilidade magnética comparado à rocha intrusiva.

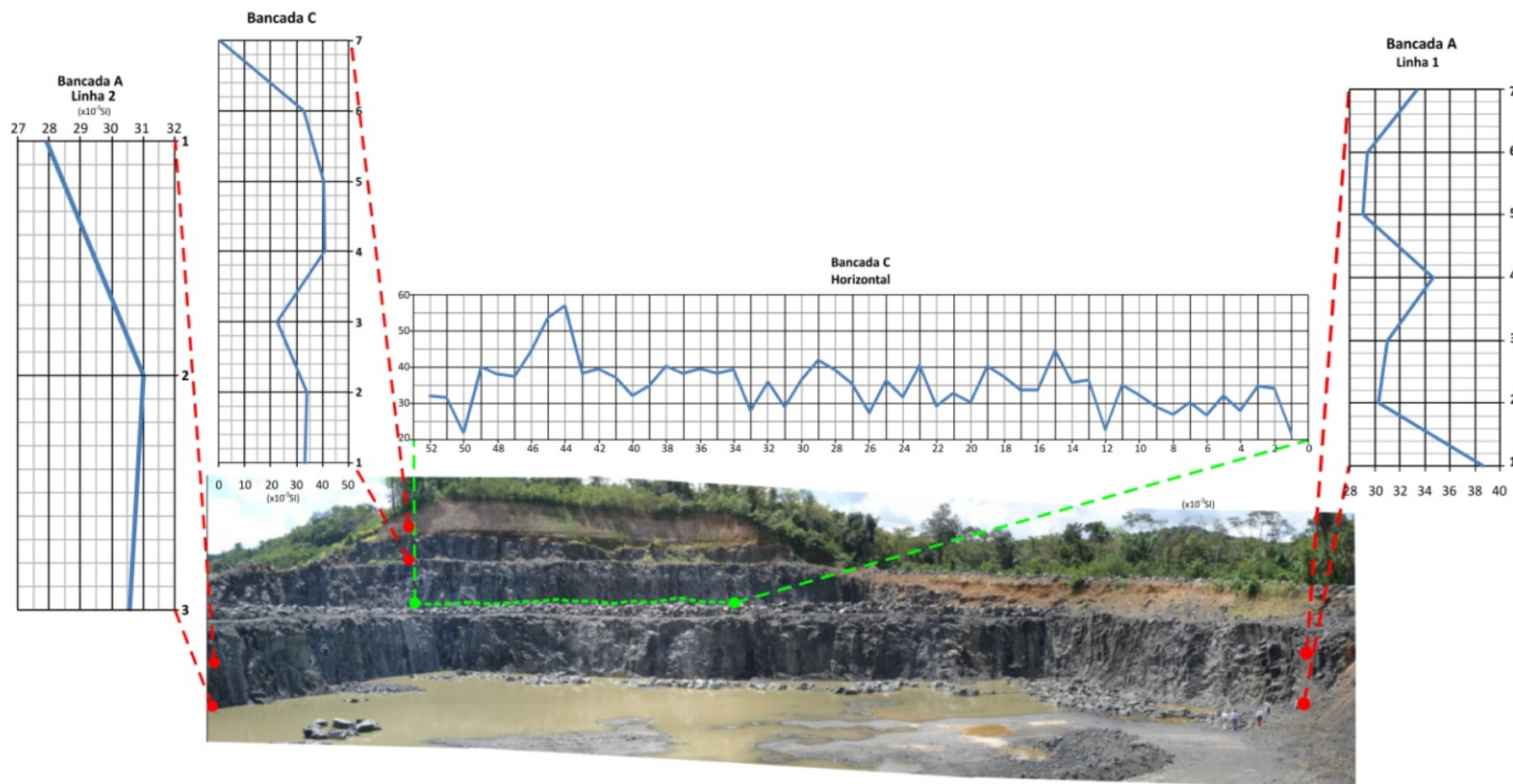


Figura 6.8: Levantamento da susceptibilidade magnética de detalhe realizado nas bancadas da frente de lavra da pedreira Três Bocas (ponto MA-21).

6.4 GAMAESTPECTROMETRIA

O levantamento radiométrico realizado em afloramentos no Domo de Monte Alegre, obtidos nos mesmos pontos que foram levantados os dados de susceptibilidade magnética, teve como objetivo medir a concentração relativa os elementos K, U e Th em rochas ígneas e sedimentares através da detecção da radiação gama emitida durante o decaimento radioativo natural destes elementos.

O equipamento utilizado em campo consiste de um gamaespectrômetro modelo GRS-500 (*Diferencial Gamma Ray Spectrometer/Scintilometer, fabricação Scintrex, Canadá*), pertencente ao LPGA/UFPR. O GRS-500 opera num intervalo de 0,08 a 0,70 MeV com uma fonte radioativa (^{137}Cs) de referência e outra de calibração (^{133}Ba), cujo fotopico é de 0,352 MeV. Possui duas janelas de contagem total (TC1 > 0,08 MeV e TC2 > 0,40 MeV), além dos seguintes intervalos energéticos, respectivamente do potássio (K) e dos equivalentes de urânio (eU) e tório (eTh): 1,35 a 1,59 MeV, 1,65 a 1,87 MeV e 2,45 a 2,79 MeV. O GRS-500 pode operar com dois tempos de integração: um e dez segundos, este último utilizado nas medições em contagens por segundo. Como o instrumento é analógico (não possui memória para armazenar as leituras), os registros foram adquiridos (e anotados em planilha) separadamente para os vários canais, do que decorre um tempo de leitura elevado, podendo superar cinco minutos por ponto. Por simplicidade e rapidez, os dados da contagem total só foram registrados no canal TC2.

Durante os trabalhos de campo foram verificadas duas estações anômalas em todas as variáveis medidas (CT, K, eU e eTh). Estes pontos estão localizados na região central do Domo de Monte Alegre e estão alinhados segundo uma direção observada em imagem aérea e orbital na direção N20W/SE. Em campo estes pontos foram referidos com numeração MA-09 e MA-32/MA-32b tratando-se de siltitos da Formação Ererê com zonas de fraturas com preenchimento de quartzo que concentram os mais elevados valores radiométricos.

Em função da constatação de picos anômalos no levantamento realizado, foram gerados dois conjuntos de mapas: um envolvendo todos os pontos, onde as anomalias ficam extremamente evidentes e mascaram os demais dados e o outro sem estas estações anômalas. Apenas por ilustração da forma como se

apresentam os dados, a Tabela 6.2 mostra parte dos dados obtidos em campo e ressalta em cor os valores radiométricos anômalos.

Tabela 6.2: Dados gamaespectrométricos (CT, K, eU e eTh) e de susceptibilidade magnética da área dos levantamentos de campo realizados no Domo de Monte Alegre.

Ponto	Susceptibilidade	CT	K	eU	eTh
MA 01	0,067	430,2	59,3	43,8	40,6
MA 02	0,053	430	59,5	45	40,8
MA 03	0,177	373	49	37	34
MA 07	0,067	345	44	36	31
MA 08	0,087	256	33	26	21
MA 09	0,163	2.358	304	270	281
MA 10	13,233	300	39	32	27
MA 11	0,743	50	7,2	5	3,7
MA 15	0,037	158	20	15	15
MA 16	0,090	426	58	49	40
MA 31	0,060	198	24	20	16
MA 32	0,153	1.390	180	145	168
MA 32b		1.200	160	140	130
MA 34	0,150	460	64	45	38

Contagem Total

O mapa da distribuição da CT (contagem total) confeccionado na região mapeada representa a somatória das contagens de K, eTh e eU.

Estes foram gerados para as duas situações, uma com os pontos anômalos identificados e outra sem a influência destes.

A Figura 6.9a exibe com destaque uma zona anômala no centro da área de estudo, correspondente às estações MA-09 e MA-32/MA-32b. Observa-se ali que os menores valores situam-se na porção imediatamente a sul daquela anomalia, em correspondência à predominância de arenitos da Formação Monte Alegre. Os demais valores são baixos a intermediários, refletindo os arenitos da Formação Ererê e siltitos da Formação Curiri.

No mapa da Figura 6.9b, gerado com a supressão dos pontos anômalos, observam-se dois tratos de valores elevados, situados a oeste e leste, os quais constituem a resposta dos siltitos das formações Ererê e Curiri.

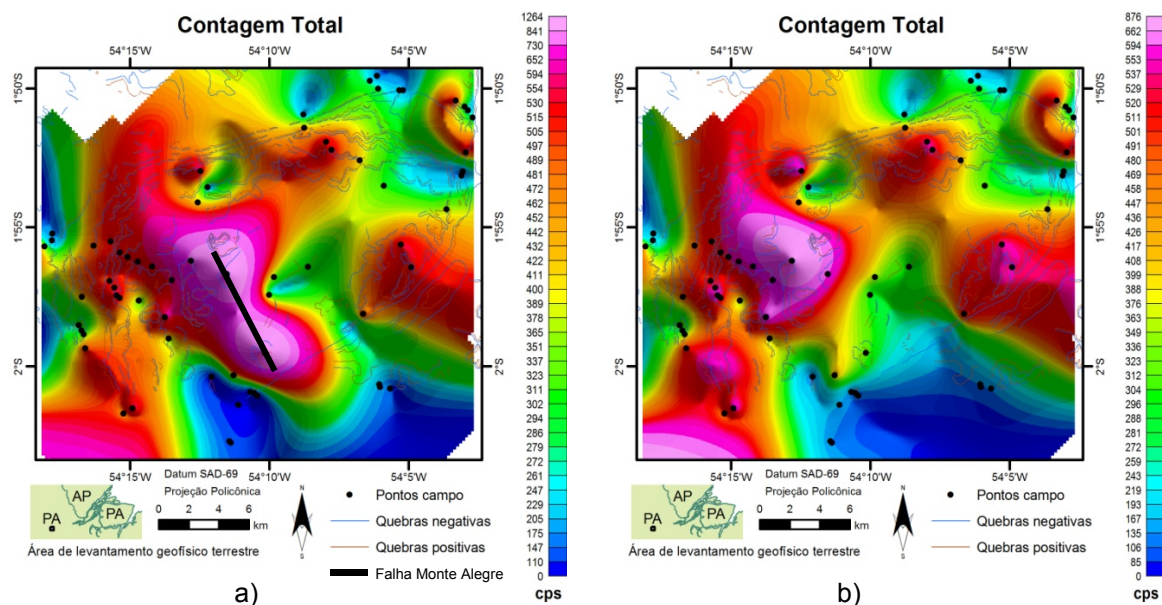


Figura 6.9: a) Mapa da Contagem total e b) Mapa da Contagem total sem os valores anômalos medidos. A área delimitada na figura engloba apenas os pontos levantados em campo.

Valores elevados de radioatividade nos siltitos são compatíveis com maior concentração de minerais de argila. As cargas as negativas dispostas na superfície destes minerais são capazes de adsorver íons com cargas opostas (cátions), como U e Th, e podem ser substituídos uns pelos outros. Esse fenômeno é conhecido como troca de cátions, e ao conjunto das cargas negativas dá-se o nome de capacidade de troca de cátions, CTC (RESENDE *et al.*, 2002).

Potássio

O potássio é detectado em levantamentos de raios gama pela medição na janela em torno da energia 1,46 MeV, emitida pelo isótopo ^{40}K , formado durante a cadeia de decaimento do próprio K. O isótopo constitui 0,01167% do K total, fornecendo, portanto, uma medida direta do teor de K na rocha ou solo (MINTY, 1997; DICKSON & SCOTT, 1997).

O mapa do potássio da região de Monte Alegre, como visto na Figura 6.10a, mostra comportamento muito semelhante ao da contagem total. O mesmo procedimento foi adotado com a supressão dos valores anômalos (Figura 6.10b).

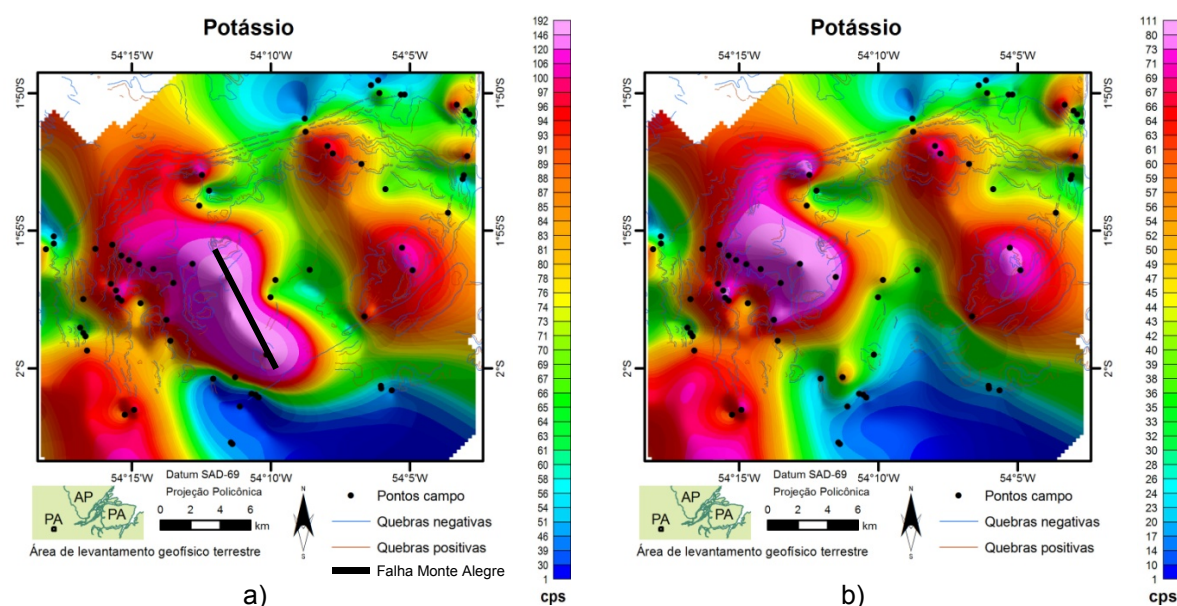


Figura 6.10: a) Mapa das medidas do Potássio e b) Mapa das medidas do Potássio sem os valores radiométricos anômalos. A área delimitada na figura engloba apenas os pontos levantados em campo.

Tório

Segundo o mesmo método aplicado para os mapeamentos anteriormente apresentados, o mapa do tório gerado para a área mapeada no DMA (Figura 6.11a), em comparação, exibe um padrão muito semelhante ao da contagem total. Os valores anômalos removidos são vistos na Figura 6.11b.

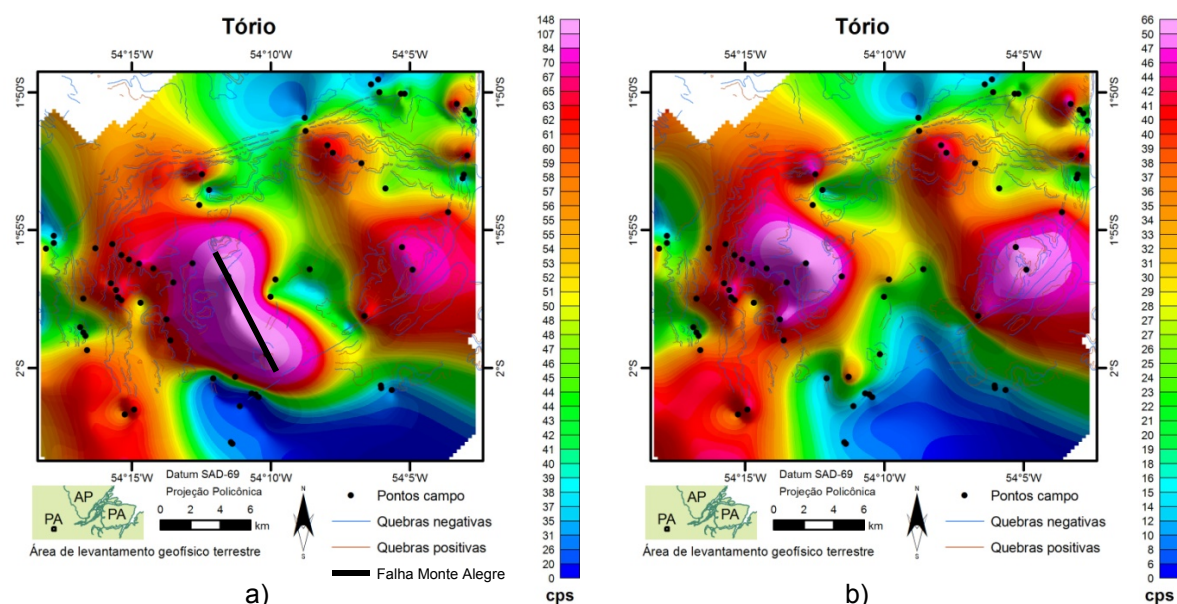


Figura 6.11: a) Mapa das medidas dos teores de Tório (eTh) e b) Mapa das medidas dos teores de Tório (eTh) sem os valores anômalos radiométricos. A área delimitada na figura engloba apenas os pontos levantados em campo.

Urânio

Em 1977, levantamentos radiométricos e caracterizações geológicas realizadas pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), revelaram ocorrências de urânio na vila Inglês de Souza, localizada na área rural de Monte Alegre (PASTANA *et al.*, 1978). A presença dessa ocorrência uranífera foi investigada pela Nuclebrás, atual Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica para exploração daquele depósito. Os resultados dos estudos de pesquisa/prospecção apontaram para sua inviabilidade econômica. No entanto, a radioatividade das rochas passou a constituir um problema para a população de Monte Alegre, a partir do momento em que o material radioativo começou a ser utilizado na construção de casas e pavimentação de ruas, tanto na área rural como urbana.

Em 1995, equipes de geólogos e geofísicos da Universidade Federal do Pará (UFPA) realizaram levantamento na cidade e apontaram elevados níveis de radioatividade (exposição externa gama). Este trabalho da UFPA embora não publicado foi amplamente divulgado e gerou grande apreensão na população local sobre possíveis efeitos à saúde, como eventual elevação da incidência de câncer decorrentes da exposição à radioatividade natural aumentada.

No mesmo ano a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) foi acionada para realizar uma avaliação da situação radiológica na cidade de Monte Alegre. A CNEN reportou que existiam apenas pontos isolados com nível de radioatividade mais elevado, os quais não poderiam causar problemas de saúde na população. A concentração de radônio nas residências apresentou valores médios superiores, comparados àqueles observados na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo; porém inferiores aos observados na cidade de Poços de Caldas, uma reconhecida área de radiação natural elevada. O radônio é um gás radiativo que se origina no decaimento do ^{226}Ra , pertencente à série do Urânio²³⁸. (MELO & GOUVEIA, 1997).

Altos valores de urânio foram detectados em dois pontos na região central do Domo de Monte Alegre. Esses pontos encontram-se na estrada que dá acesso à Serra do Ererê e na estrada que dá acesso à vila Camp, anteriormente chamada de Vila dos Ingleses. Como já mencionado estes pontos estão alinhados segundo uma direção N20W/SE e estão concentrados nos veios de quartzo

presentes em zonas de fraturas.

Ainda conforme o padrão adotado para os demais mapas, o mapa do urânio da Figura 6.12a com a presença dos pontos anômalos (270 e 145 SI), se assemelha ao da contagem total da Figura 6.9a. Da mesma forma, a Figura 6.12b guarda correspondência com o mapa da Figura 6.9b.

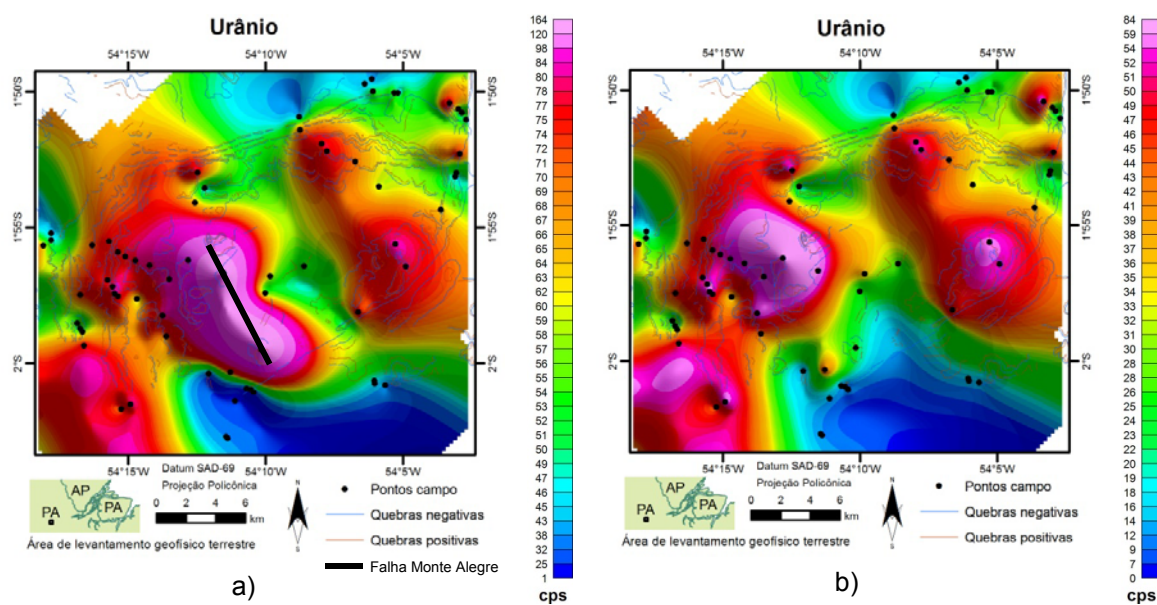


Figura 6.12: a) Mapa das medidas dos teores de Urânio (eU) e b) Mapa das medidas dos teores de Urânio (eU) sem os valores anômalos de urânio. A área delimitada na figura engloba apenas os pontos levantados em campo.

7 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural foram utilizadas informações e dados estruturais de campo, que foram analisadas em conjunto com as interpretações de dados de sensores remotos e fotografias aéreas.

As estruturas identificadas em campo foram analisadas segundo seus atributos descritivos e indicadores cinemáticos.

Os principais elementos estruturais descritos em campo compreendem sistemas de juntas, falhas e posição do acamamento, que ocorrem em direções variadas e com mergulhos sub-verticais. As fraturas que agrupam as juntas e falhas foram descritas conforme a geometria, espaçamento, rugosidade, abertura, preenchimento e indicadores cinemáticos.

Nesta análise estrutural procurou-se, ainda, separar os eventos de deformação registrados na região do Domo de Monte Alegre, a partir dos dados advindos das falhas.

7.1 ANÁLISE GEOMÉTRICA

Esta análise que é parte descritiva da análise estrutural, implica no estudo da forma, da orientação e do tamanho das estruturas. Estes estudos envolveram observações diretas no campo e análise dos dados com base em estereogramas estruturais.

A Figura 7.1 mostra a distribuição dos pontos mapeados no Domo de Monte Alegre.

As medidas de campo (e.g.: fraturas, dobras, estrias, acamamento e paleocorrentes) foram adicionadas em uma única tabela. Essas medidas totalizaram 1.100, sendo destas 164 medidas referentes a acamamento, 4 referentes a crista de *ripples*, 26 referentes a dobras, 4 para o eixo referentes a eixos de *kink bands*, 777 referentes a fraturas, 74 referentes a estrias e 51 referentes a paleocorrentes.

Os dados obtidos das imagens complementaram os dados de campo

possibilitando que a análise integrada destes diferentes níveis de escalas e abordagem, resultassem na interpretação em termos de disposição, geometria, cinemática e unidades estratigráficas onde se situam.

Dentre as diversas estruturas encontradas, os sistemas de juntas são mais abundantes apresentando-se mais frequente a geometria plana. No geral as fraturas apresentam-se tanto abertas com veios mineral, quanto fechadas.

A identificação da falha contou com o reconhecimento de indicadores cinemáticos como estrias, *steps* (degraus), sigmóides, e fraturas escalonadas. Neste trabalho de mapeamento foram identificadas diversas fraturas retilíneas, anastomosadas, sigmoidais, escalonadas, em *relay* e *kink bands*, que serão apresentadas separadamente.

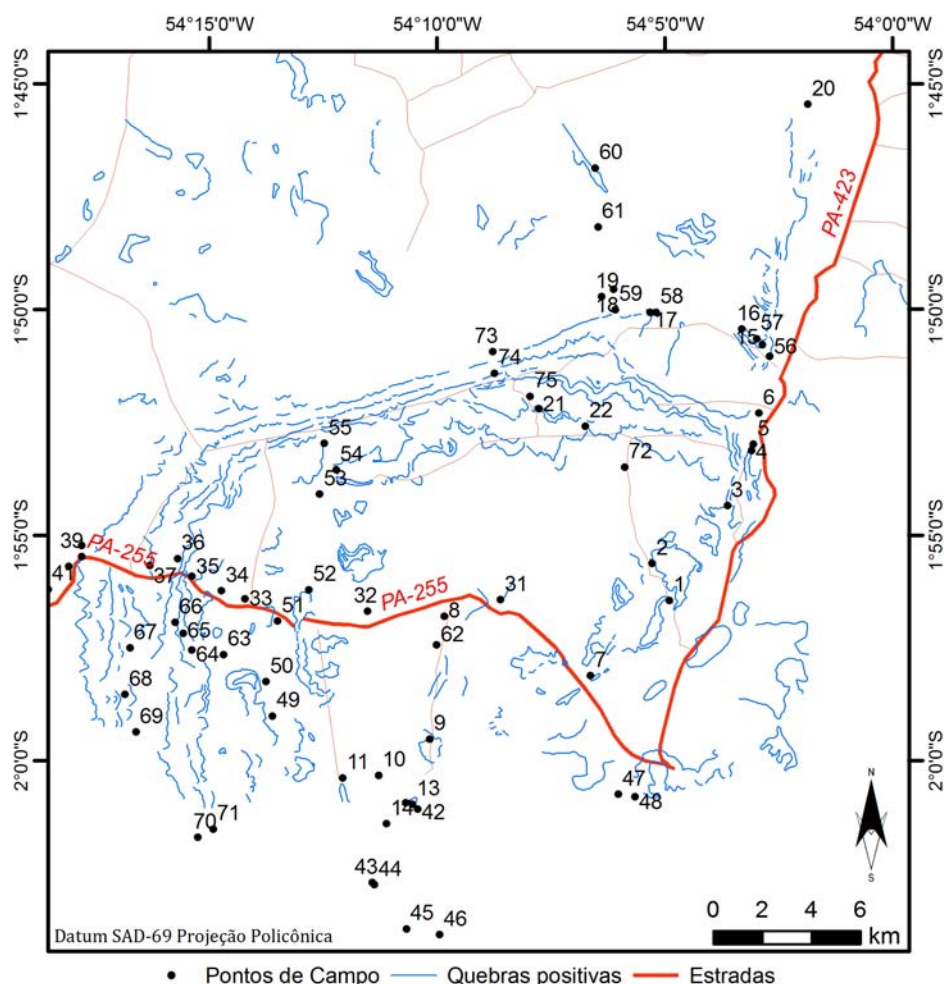


Figura 7.1: Porção do DMA. Localização dos pontos mapeados em campo com a indicação das quebras positivas para referência.

As **fraturas planares** ou retilíneas apresentam-se de forma sistemática

em afloramentos, são penetrativas, com espaçamento centimétrico a métrico e é comum a presença de preenchimento por óxido de ferro. Em diversos afloramentos foram identificados pares conjugados com fraturas planares. Exemplos destas fraturas podem ser vistos na Figura 7.2.

Já as **fraturas anastomosadas** ou dispostas de forma curva foram verificadas em arenitos da Formação Ererê, Faro e Monte Alegre, conforme visto na Figura 7.3. Na porção central do DMA, foram identificados em dois pontos, como já descrito anteriormente, ocorre falha anastomosada com preenchimento por óxido de ferro e quartzo euédrico com associação de elementos com propriedades radioativa, como mostra a Figura 7.3E.

Outras geometrias de fraturas verificadas em campo foram as escalonadas, sigmoidais e padrão em *relay*. As **fraturas escalonadas** foram identificadas nos siltitos da Formação Ererê do ponto MA-01, siltitos da Formação Faro observado na borda nordeste do domo, e arenitos na Serra do Ererê ponto MA-42 (Figura 7.4).

O **padrão em relay**, em segmentos de falhas paralelas formando um conjunto maior, foi identificado nos arenitos da Formação Monte Alegre, situado na porção norte do Domo (MA-18), intrusivas na borda oeste do DMA (MA-39) e nos arenitos da Formação Faro, presentes também na borda oeste do domo no ponto MA-41, (Figura 7.4 C e E). As **fraturas sigmoidais** foram identificadas desde escalas centimétricas (Figura 7.4-B) a dezenas de metros (Figura 7.4-D).

As **kink bands** observadas ocorrem nos siltitos situados na borda leste do domo e nos siltitos da Formação Ererê na borda sudeste da estrutura (Figura 7.5).

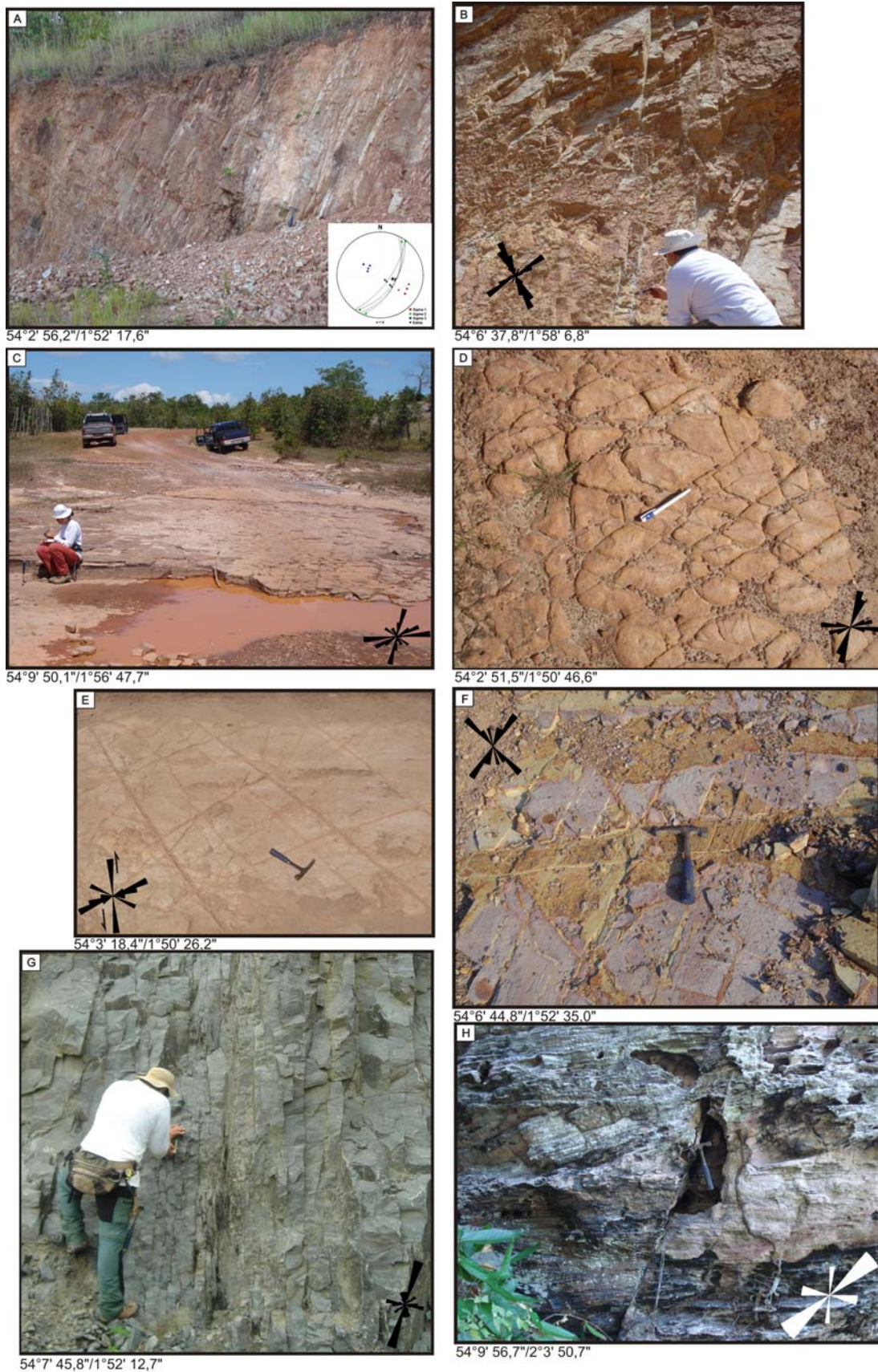


Figura 7.2: Exemplos de fraturas planares identificadas em campo. Pontos (A) MA-06 Formação Faro e (B) MA-07 Formação Ererê; (C) MA-08 Formação Ererê; (D) MA-15 Formação Faro (E) MA-16 Formação Faro; (F) MA-22 Formação Ererê; (G) MA-21 Penatecaua e (H) MA-46 Formação Alter do Chão.

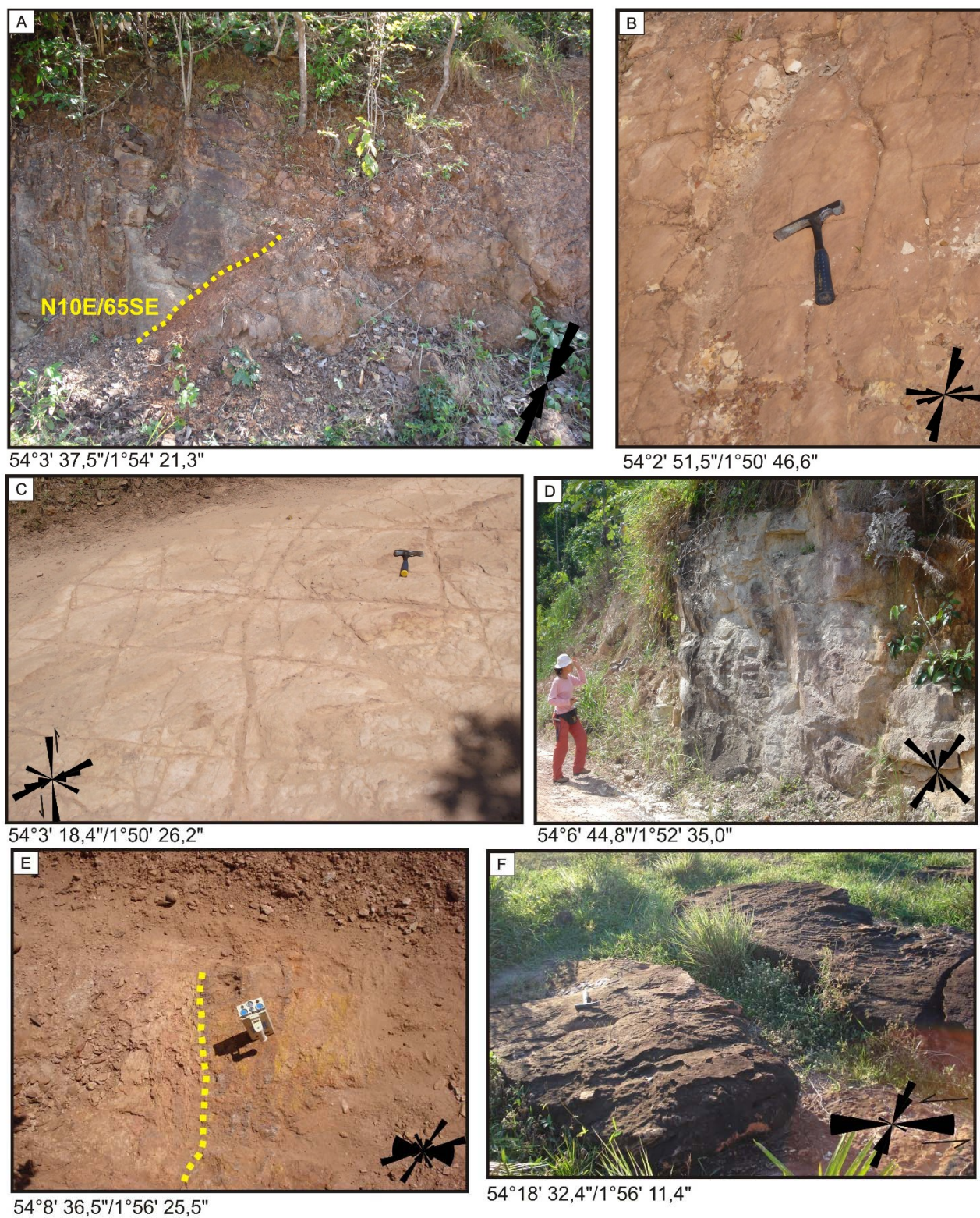


Figura 7.3: Exemplo de fraturas anastomosadas. (A) MA-03 Formação Ererê; (B) MA-15 e (C) MA-16 Formação Faro; (D) MA-22 Grupo Trombetas; (E) MA-31 Formação Ererê e (F) MA-41 Formação Monte Alegre.

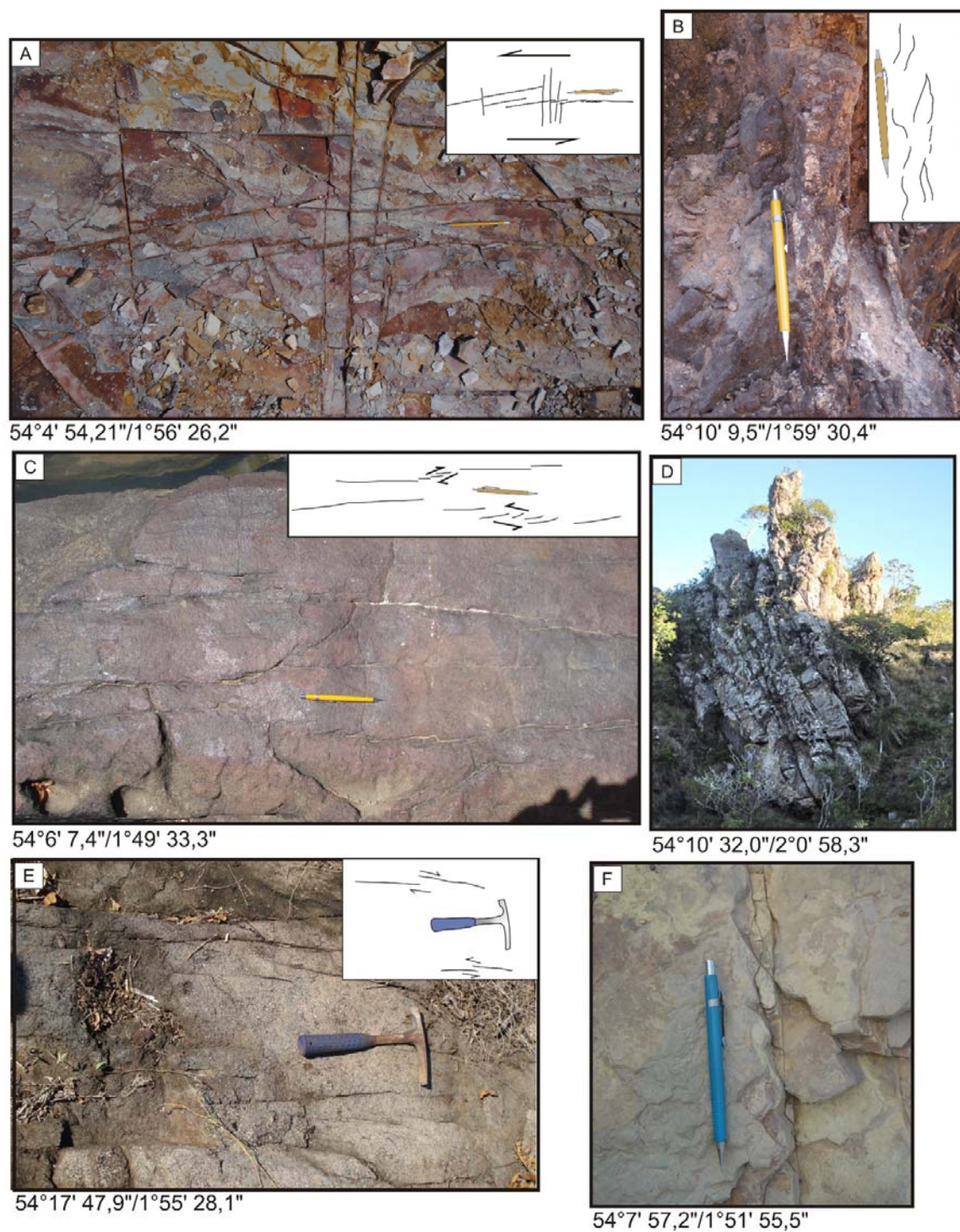


Figura 7.4: Exemplos de fraturas escalonadas, padrão em *Relay* e sigmoidais. (A) MA-01 e (B) MA-09 Formação Ererê; (C) MA-18 Formação Monte Alegre; (D) MA-13 Formação Monte Alegre; (E) MA-39 Penatecaua e (F) MA-75.

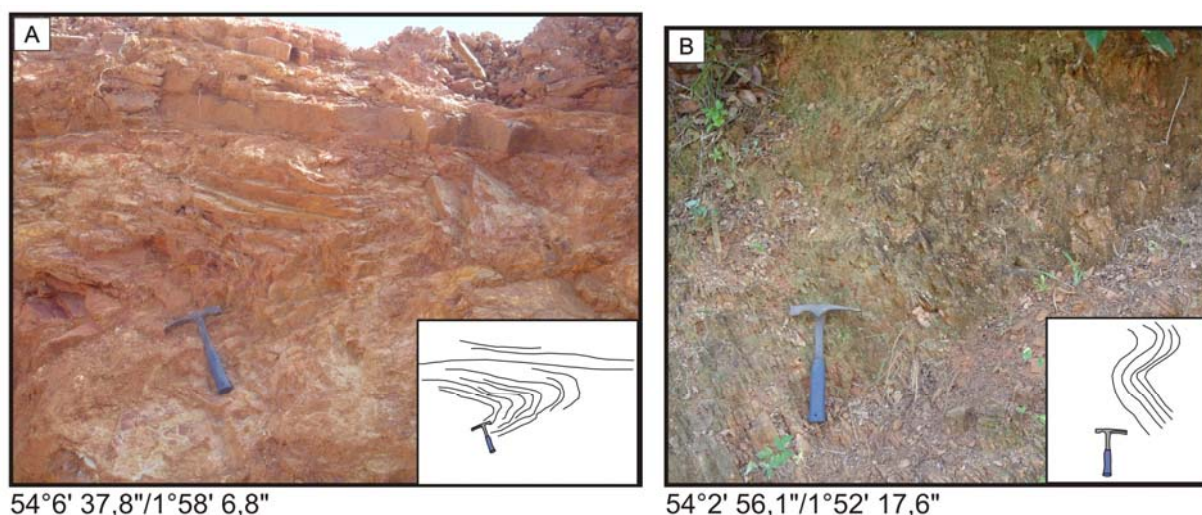


Figura 7.5: Estruturas *kink bands*, de origem tectônica, encontradas em zonas de falhas dos pontos MA-07 (A) e MA-03 (B), ambos nos siltitos da Formação Ererê.

Alguns indicadores cinemáticos, como estrias e *steps*, foram encontrados nos arenitos da Formação Ererê do ponto MA-07 e gabros da pedreira Três Bocas no ponto MA-21 (Figura 7.6).

Em campo, no total foram identificadas 753 medidas de fraturas com mergulhos empinados geralmente sub-verticais e até verticais.

Para facilitar a análise da deformação estrutural nas rochas do Domo de Monte Alegre, a partir das fraturas identificadas em campo, para cada ponto descrito foram gerados estereogramas. A integração de todos os estereogramas gerados nesta fase preliminar de análise está apresentada na Figura 7.7, que mostra além do diagrama, sua localização.

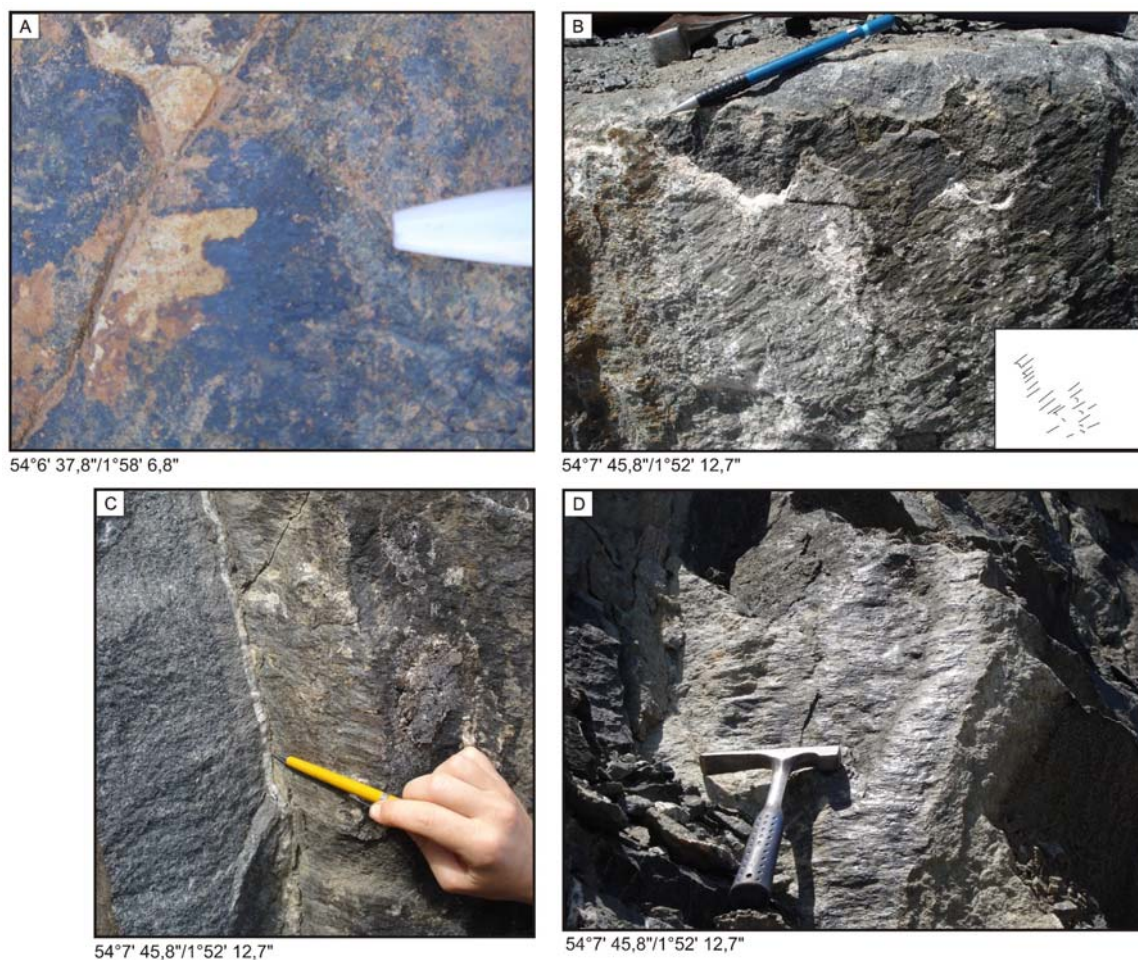


Figura 7.6: Indicadores cinemáticos como estrias e *steps* do ponto MA-07 (A) e MA-21 (B, C e D).

No mapa da Figura 7.7 os pontos com dados de falhas, estão representados pela projeção ciclográfica dos planos com as indicações dos σ_1 , σ_2 e σ_3 .

Em alguns afloramentos foi possível a comparação com os planos do Modelo de *Riedel* (R, R', Y), como foram representados nos afloramentos MA-18, MA-09 e MA-31. As falhas transcorrentes dextróginas e sinistróginas foram identificadas em diversos pontos como MA-41, MA-18, MA-16, MA-06, MA-39, MA-31, MA-01, MA-07 e finalmente falhas reversas e normais nos pontos MA-01 e MA-13, respectivamente.

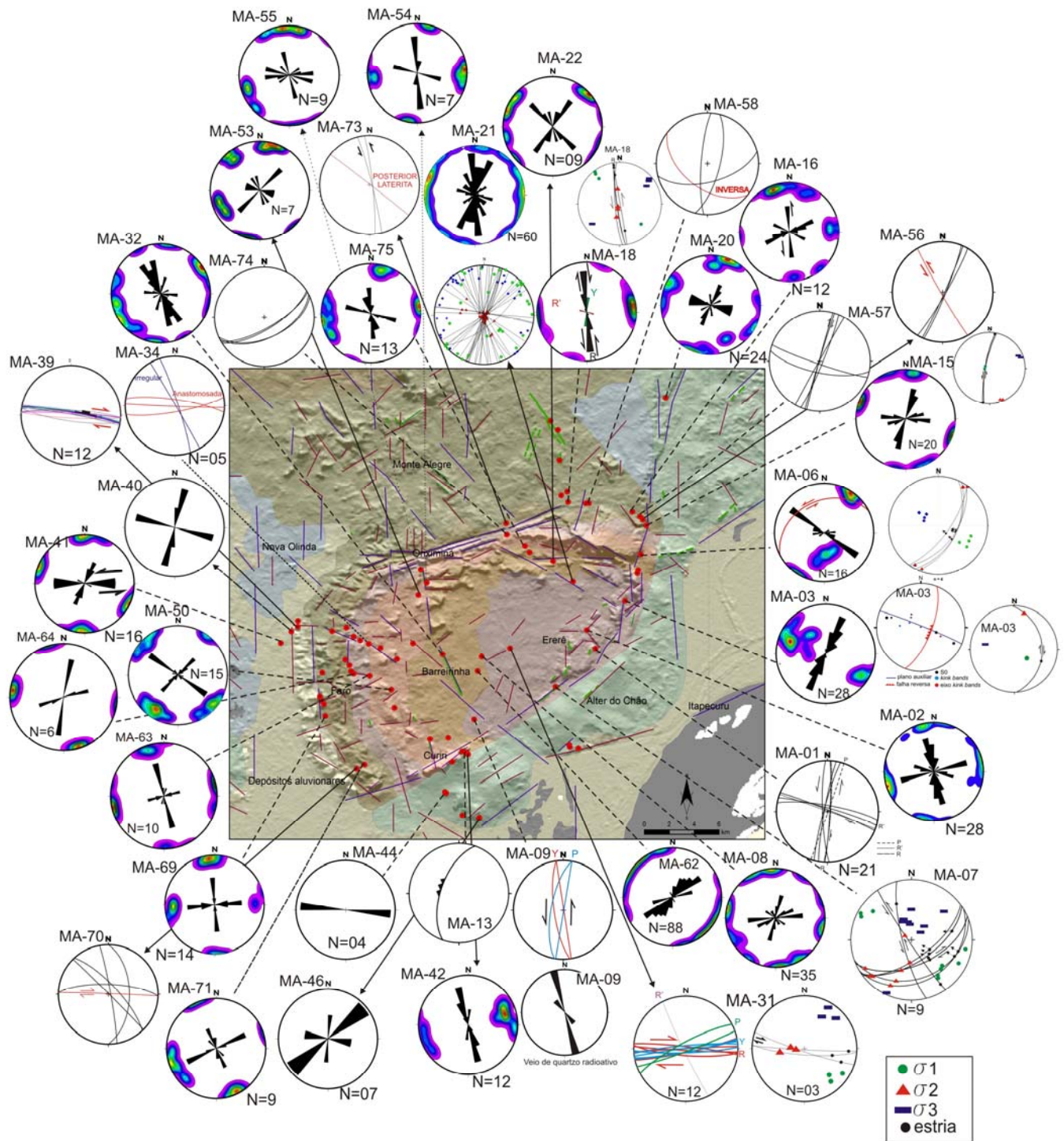


Figura 7.7: Modelo SRTM com a localização dos pontos descritos em campo e diagramas estereográficos sinópticos correspondentes.

7.1.1 Análise das estruturas por Unidade Geológica

Após esta etapa da caracterização do ponto descrito, iniciou-se o processo da análise das fraturas por unidade geológica, conforme mostra a Tabela 7.1, na tentativa de se obter as principais direções registradas por intervalo de tempo (idade geológica). De forma resumida, as medidas estruturais foram separadas pelas unidades estratigráficas como vista na Figura 7.8.

Tabela 7.1: Numeração dos pontos descritos em campo e sua respectiva unidade geológica, cujos dados foram utilizados na análise estrutural.

UNIDADE	PONTOS
Fm. Alter do Chão	MA-42, MA-44, MA-46
Penatecaua	MA-21, MA-54, MA-56, MA-39,
Fm. Nova Olinda	MA-20
Fm. Monte Alegre	MA-18, MA-40, MA-41, MA-58, MA-73
Fm. Faro	MA-6, MA-15, MA-16, MA-57, MA-67, MA-69, MA-70, MA-71, MA-74
Fm. Oriximiná	MA-34, MA-55, MA-63, MA-64, MA-66, MA-75
Fm. Curiri	MA-30, MA-50, MA-51
Fm. Barreirinha	MA-52, MA-53
Fm. Ererê	MA-1, MA-2, MA-3, MA-7, MA-8, MA-9, MA-22, MA-31, MA-32, MA-62, MA-72
Fm. Manacapuru	MA-25, MA-26

Na Formação Ererê as principais fraturas apresentam direções entre N30-40E, N30-40W e N50-80E. Nesta unidade foi obtido o maior número de atitudes e, cronologicamente, por tratar-se da unidade mais antiga identificada em campo, guarda diversos registros das deformações posteriores.

As deformações registradas na Formação Barreirinha apresentam modas de N10-20E, N40-60E, N80-90E e N50-60W. Em afloramentos da Formação Curiri foram medidas apenas 11 medidas, cujos pontos localizam-se na borda oeste da estrutura dômica, com direções estruturais entre N80-90W.

As 76 fraturas identificadas na Formação Oriximiná orientam-se essencialmente a N-30W e E-W, com mergulhos subverticais. Na Formação Faro as fraturas revelam direções N-S, N60-70E e E-W.

Na Formação Monte Alegre foram realizadas 112 medidas estruturais, entre juntas, planos de falhas e lineações. Os diagramas de rosetas da Figura 7.8 mostram direções entre N-N20W, N30E e N55W - E-W.

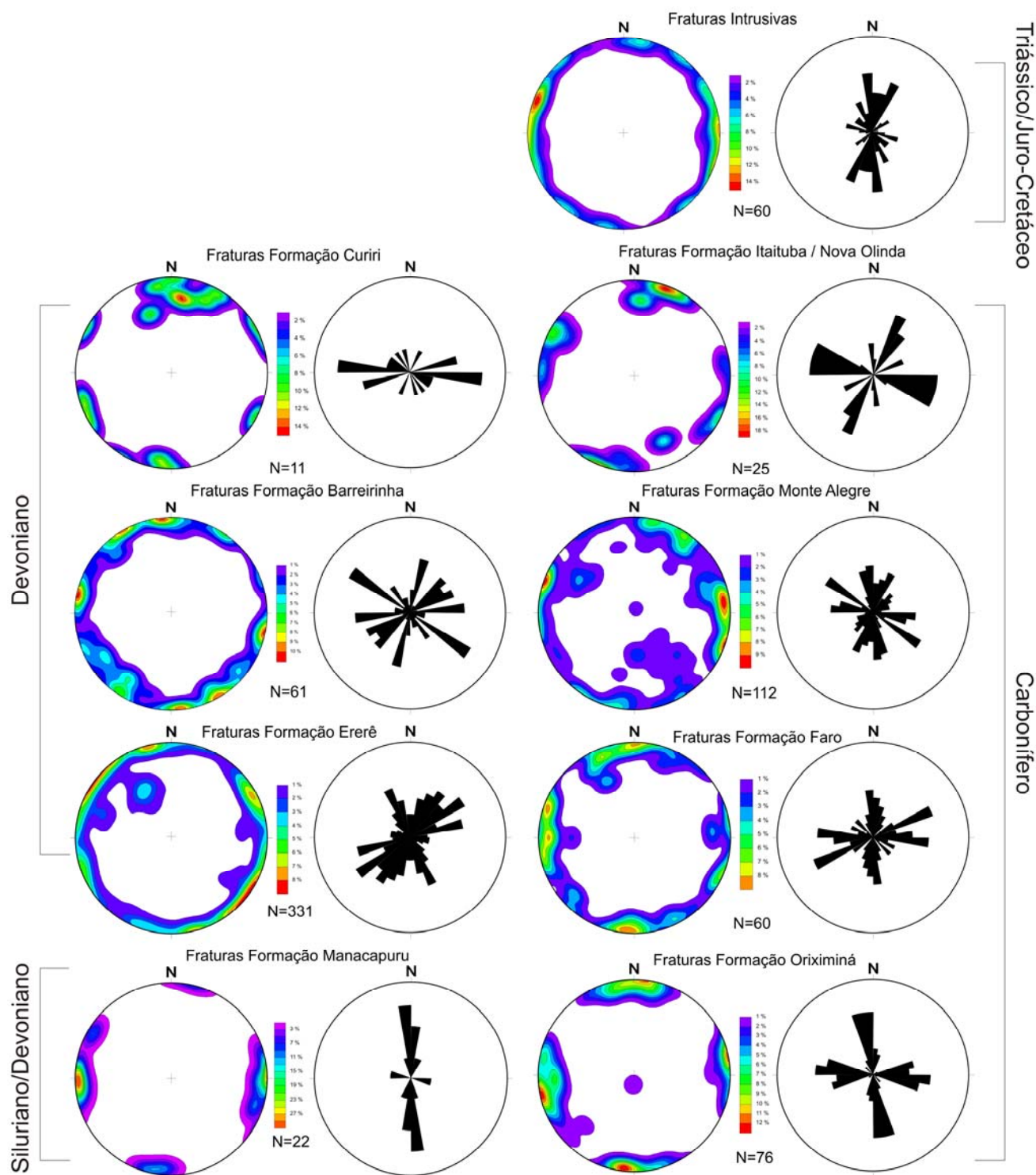


Figura 7.8: Estereogramas sinópticos individualizados das unidades geológicas.

Os calcários da Formação Nova Olinda/Itaituba foram reconhecidos apenas na pedreira da Calpará no ponto MA-20, situado na porção nordeste do DMA. Nas diversas bancadas da frente de lavra foram efetuadas 25 medidas com direções preferenciais para N60-90W.

Por fim, as rochas intrusivas descritas como diques e *sills* apresentam direções de fraturamento preferencial à N-S.

Esta integração de diagramas possibilitou ver que entre as rochas do devoniano, Formações Barreirinha e Ererê, apresentam fraturas com direções radiais dispersas e estas principalmente ocorrem no interior do domo. A direção N-S é presente nas rochas desde a Formação Manacapuru do Siluriano/Devoniano ao Mesozóico e que nas rochas ígneas do Penatecaua a direção E-W é pouco frequente.

7.2 ANÁLISE DINÂMICA

Esta análise contou com a interpretação das tensões responsáveis pela formação das estruturas (paleotensões) e para isso foi necessário o entendimento prévio da geometria e da cinemática das fraturas identificadas em campo que foram apresentadas na análise geométrica.

Após a análise geral das fraturas descrita, para esta etapa, utilizou-se essencialmente os dados das falhas geológicas, ou seja, entre as fraturas onde foi possível a identificação do plano, estria e cinemática. Com base nos métodos, anteriormente apresentados as falhas foram analisadas nos programas Stereonet, Sigmas e Win_Tensor.

Inicialmente foram calculados os pontos das paleotensões (σ_1 , σ_2 e σ_3) pelo programa Sigmas, cujos resultados foram inseridos no Stereonet, como apresentado na Figura 7.9 e avaliados com intuito de visualizar sua distribuição no diagrama e distinguir campos preferenciais.

Para este estudo foram utilizados dados de 61 medidas estruturais e representam 49 pontos de afloramentos descritos.

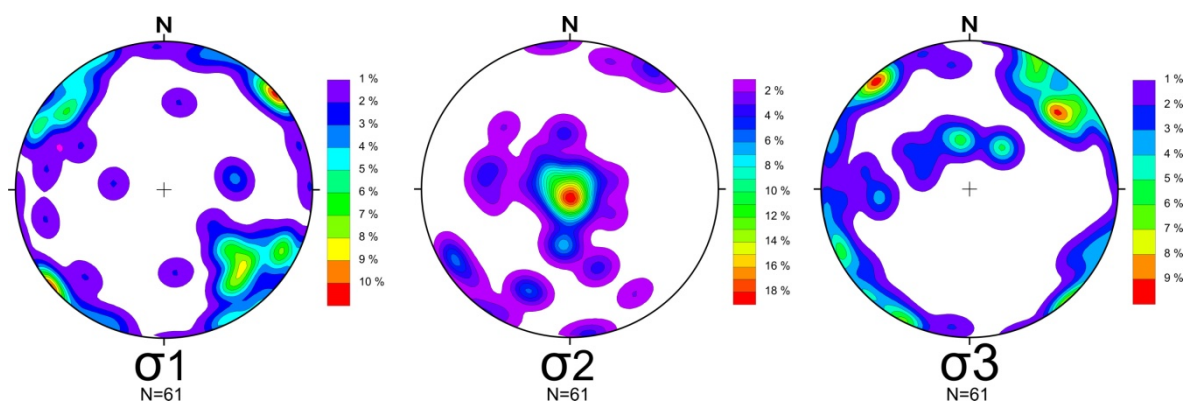


Figura 7.9: Diagramas estereográficos total das paleotensões, obtidas dos pontos mapeados em campo.

Esta primeira análise, pela alta frequência dos campos de tensão com valores com cores amarela, laranja e vermelha, permitiu-se inferir que existem no mínimo duas direções preferenciais distintas. Uma com direção NW-SE e a segunda com direção NE-SW.

Em uma segunda etapa, na tentativa da definição da hierarquia entre as falhas na escala de tempo, as falhas foram separadas entre unidades geológicas. Para isto foram produzidos diagramas estruturais com guirlandas e pontos que representam os campos de tensões (σ_1 , σ_2 e σ_3). Nos programas Stereonet e Win_Tensor foram feitos os diagramas de rosetas e neste último obteve-se a direção dos esforços compressoriais e distensionais apontados por setas e diagrama dos diedros retos. Os resultados foram confrontados e a comparação serviu para validação dos dados gerados entre programas, o que permitiu uma maior confiabilidade no resultado final.

Ainda para cada unidade geológica foram resgatados os diagramas de rosetas e contorno dos pólos apresentados na Figura 7.8. A integração desses dados é visto na Figura 7.10. Nesta integração foi possível definir que nas rochas que compreendem o intervalo do Devoniano ao Carbonífero, o comportamento da direção das fraturas e a posição dos campos de tensão apresentam-se semelhantes.

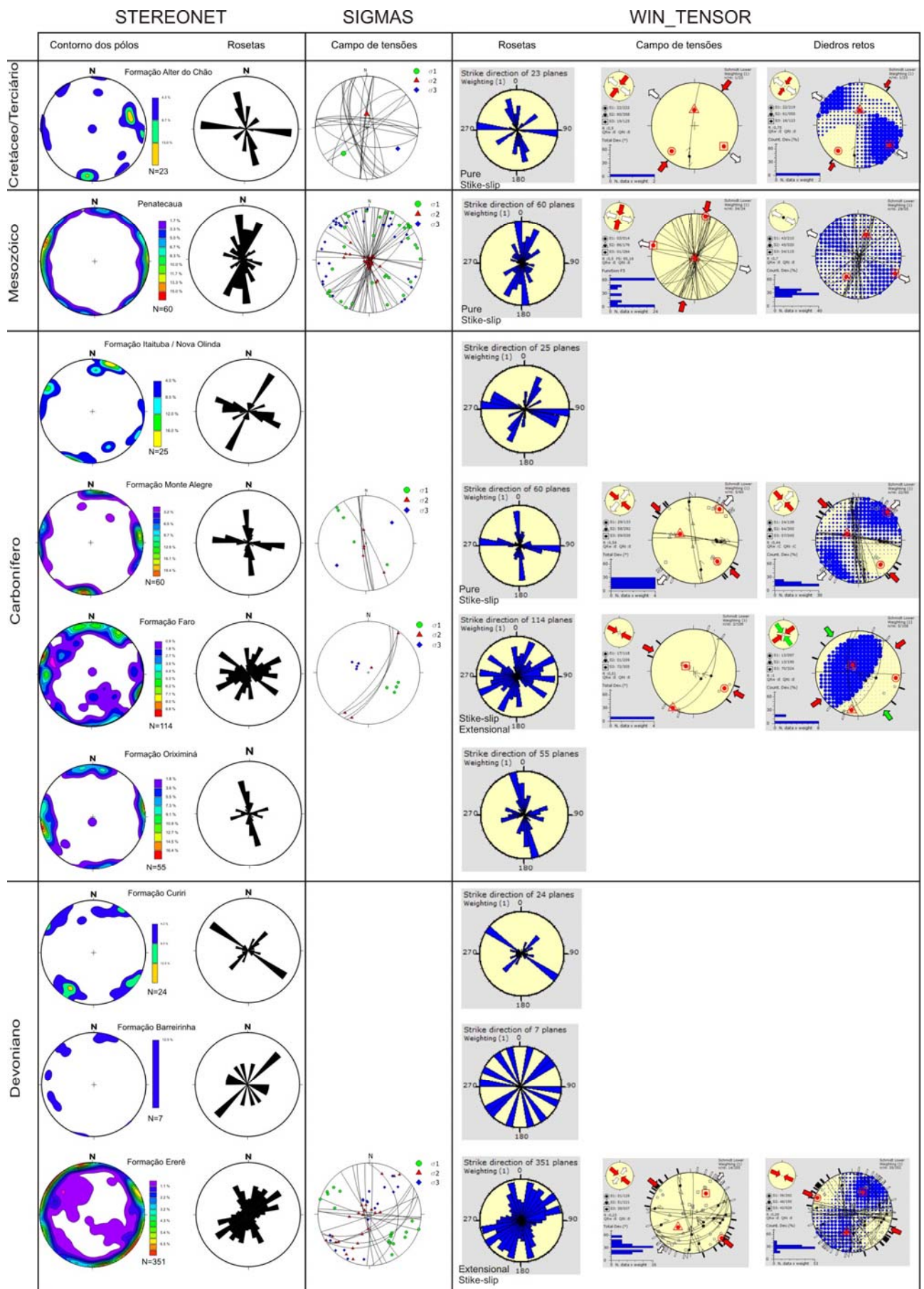


Figura 7.10: Diagramas estruturais realizados pelos programas Stereonet, Sigmas e Win_Tensor.

Quando analisadas as fraturas das rochas intrusivas do Triássico/Juro-Cretáceo, verificou-se no diagrama do campo de tensões, obtido pelo Sigmas, que ocorrem concentrações maiores à NE/SW, havendo porém dispersão à NW/SE. Este resultado também foi obtido no processamento dos dados pelo Win_Tensor, onde observa-se que as maiores tensões estão à NE/SW que representa a média das medidas.

Embora se tenha mapeado apenas uma falha nas rochas da Formação Alter do Chão, o que não representa a média das tensões daquela unidade estratigráfica, isto foi considerado na análise, pelo fato de haver coincidência com resultados das deformações das rochas intrusivas do Penatecaua. Porém para esta informação pontual, não foi dada igual importância em comparação às outras unidades onde a repetição do dado aumenta o grau de confiança em si.

Especificamente nas falhas das rochas intrusivas, representadas pelo evento Penatecaua, verificou-se que existem campos de tensões com duas diferentes concentrações, um com σ_1 à NW/SE e o outro à NE/SW.

Estas mesmas falhas foram analisadas com informações de campo e constatou-se que as falhas com σ_1 à NW/SE apresentam caráter cisalhante, tendo sido cortadas pelas falhas NE/SW que são abertas e preenchidas por quartzo euédrico e calcita. Estas informações serão melhores discutidas no item da fase de deformação e constam aqui apenas para auxiliar no entendimento que as fraturas geradas nos diferentes campos de tensões, apresentam também comportamentos distintos em afloramentos.

Com base nestas informações os dados foram separados e as falhas com características semelhantes foram agrupadas. Seguindo os mesmos passos da análise feita para as unidades apresentadas na Figura 7.10 e assim foram construídos diagramas distintos conforme apresentado na Figura 7.11. Nesta Figura 7.11, os diagramas dos campos de tensões mostrado pelo programa Sigmas indica diferentes posições para os diagramas. Esta diferença também é vista nos diagramas feitos pelo Win_Tensor.

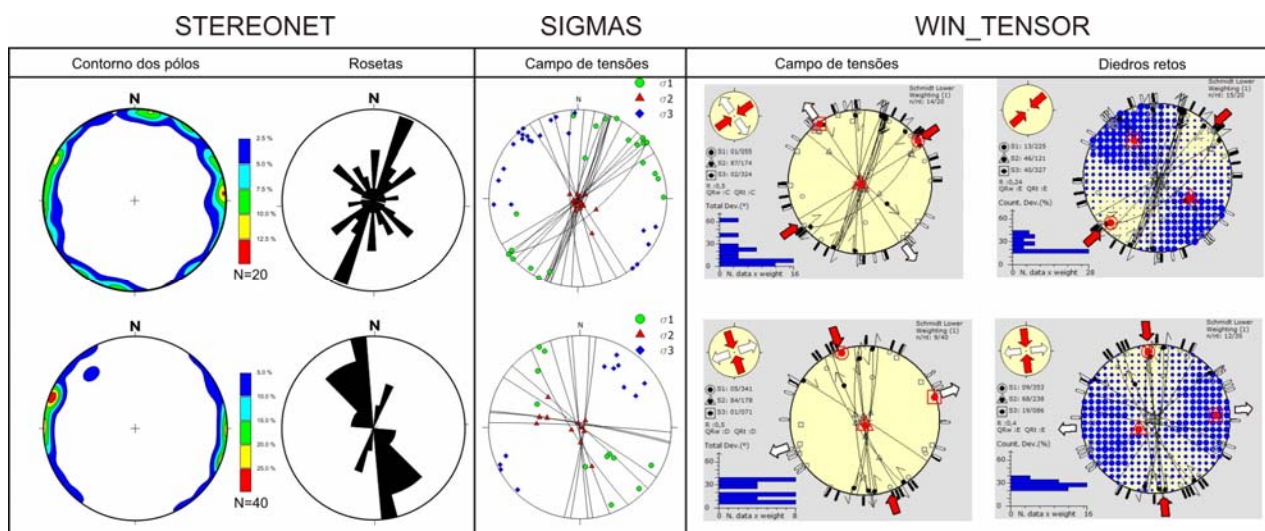


Figura 7.11: Diagramas estruturais realizados para as rochas intrusivas do evento Penatecaua de falhas encontradas no Domo de Monte Alegre.

Como o levantamento dos dados estruturais foi realizado apenas na região mapeada do Domo de Monte Alegre, este trabalho teve como contribuição a definição das fases de deformação apenas para esta região. Assim definiu-se a hierarquização destes eventos, com a nomenclatura de DN+(n°).

A análise dinâmica apresentada permitiu a identificação de 2 fases de deformação distintas. Porém como fase precursora a estas fases de deformação, atribuiu-se a fase DN ao soerguimento provocado pela Orogenia Gondwanide com intrusão magmática do evento Penatecaua.

A fase de deformação DN+1 é encontrada em rochas do Devoniano ao Juro-Cretáceo e a segunda fase (DN+2) só observada nas falhas que seccionaram rochas intrusivas do Penatecaua e nos arenitos da Formação Alter do Chão. Este evento apresenta comportamento diferenciado daqueles identificados na DN+1, por ocorrerem falhas abertas com preenchimento de quartzo euédrico, calcita e calcopirita e pelo campo de tensão máxima (σ_1), com direção NE-SW.

Estas fases de deformação estão esquematizadas na Figura 7.12, havendo detalhamento de cada uma delas em separado.

Fases de Deformação Domo Monte Alegre

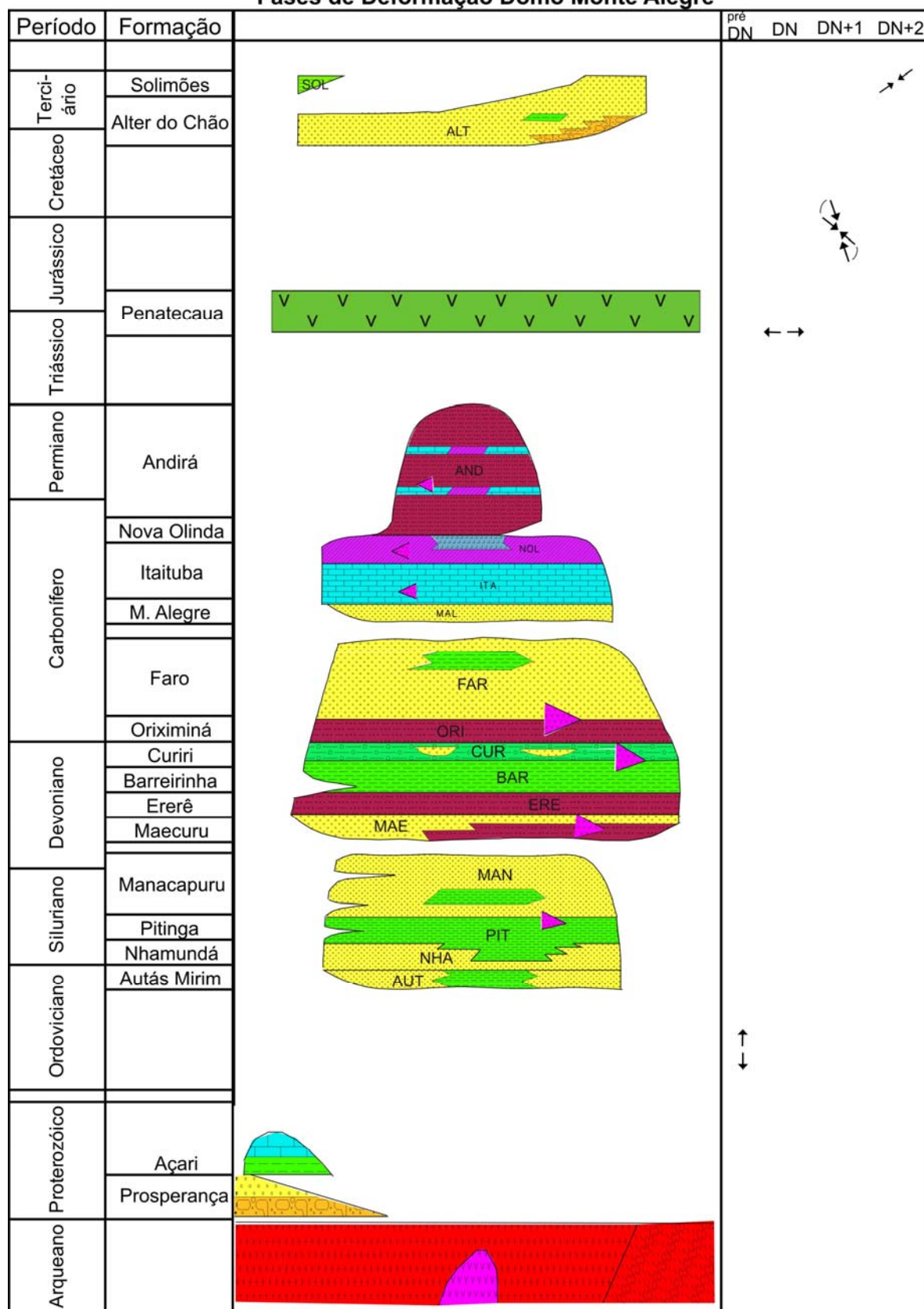


Figura 7.12: Esquema dos campos máximo de tensão (σ_1) das fases de deformação encontradas na análise estrutural realizada na região do Domo de Monte Alegre. Carta Estratigráfica modificada de Cunha *et al.* (1994).

FASE DN

A fase (DN) é atribuída aos processos distensivos que a Bacia do Amazonas sofreu, com direção leste-oeste, seguidos de magmatismo básico, permo-jurássico na forma de enxames de diques e soleiras de diabásio orientados na direção norte-sul. Tal magmatismo descrito por Thomaz Filho *et al.* (1974), na borda norte da bacia, é denominado de Penatecaua, com espessura máxima das soleiras, da ordem de 915 metros.

Thomaz Filho *et al.* (1974) consideram às intrusões permo-jurássico com formação de dutos norte-sul, relacionadas ao término dos esforços gonduanides e que estes magmas básicos ocupariam as fraturas originadas ou reativadas pelo processo de separação das placas africana e sul-americana.

FASE DN+1

Para a fase DN+1 foram caracterizadas as falhas em rochas do Devoniano Médio ao Juro-Cretáceo, ou seja, em rochas desde a Formação Ererê, do Grupo Urupadi até rochas magmáticas do evento Penatecaua. No total foram 38 medidas distribuídas em 9 pontos, as informações relativas a estas falhas estão apresentadas na Tabela 7.2 (páginas 117 e 118).

A geometria da deformação deste sistema de fraturas mostrou um quadro de cisalhamento rúptil relativamente complexo, representado por um sistema de falhas de características semelhantes.

Nesta fase DN+1, as direções dos planos de falha T, ou vetor de paleotensão máxima σ_1 , tende a ser NW-SE (N45W), o σ_2 encontra-se na vertical com componentes NE e SW e o (σ_3) está posicionado à NE-SW com uma pequena dispersão vertical. Estas informações são ilustradas nos diagramas da Figura 7.13, dos três campos de tensões e também as rosetas dos planos de falha utilizados nesta análise dinâmica. As falhas encontram-se preferencialmente na direção N-S e NE-SW.

Para esta fase foram identificadas descontinuidades estruturais planares, lisas, sistemáticas, densas, métricas a decamétricas, em geral fechadas, empinadas a verticais.

As direções médias encontradas foram N10W e N80W, sendo estas as principais direções das famílias de falhas, todavia, há outras direções importantes

neste mesmo sistema, como, por exemplo, a direção N45W. Este sistema de falhas frequentemente é responsável por intensa cataclase e cominuição das rochas afetadas.

Este evento gerou falhas sinistróginas na direção N-S que foram mapeadas nos siltitos da Formação Ererê no ponto MA-01, MA-03 e MA-07. Ocorrem também, falhas inversas com direções entre N70E/SW, mapeadas no ponto MA-07 e N40-50E/SW no ponto MA-06 e falhas dextróginas com direção N70-80W/SE encontrados nos siltitos da Formação Ererê situado no ponto MA-31.

Tabela 7.2: Medidas dos planos de falhas e os tensores respectivos para a fase DN+1.

PONTO	FORMAÇÃO	CINEM.	PLANO		ESTRIA		σ_1		σ_2		σ_3	
MA 01	Ererê	sinistrógiro	93	86	182	10	151	6	24	79	242	8
MA 01	Ererê	sinistrógiro	265	84	177	10	144	21	339	68	236	5
MA 03	Ererê	sinistrógiro	88	32	114	29	287	0	17	11	195	78
MA 06	Faro	inversa	114	55	104	57	108	27	200	4	299	62
MA 06	Faro	inversa	118	55	135	55	127	25	33	7	287	63
MA 06	Faro	inversa	125	57	110	57	117	27	210	6	313	61
MA 06	Faro	inversa	126	70	135	70	129	40	37	2	303	49
MA 07	Ererê	inversa	157	55	136	53	145	23	239	10	351	63
MA 07	Ererê	inversa	157	55	135	55	144	25	239	10	349	61
MA 07	Ererê	inversa	149	30	109	24	298	4	206	17	42	72
MA 07	Ererê	inversa	146	60	124	60	134	30	230	9	335	57
MA 07	Ererê	inversa	146	60	75	30	99	10	200	45	359	42
MA 07	Ererê	inversa	144	65	116	60	130	31	228	12	336	55
MA 07	Ererê	inversa	160	35	102	20	296	6	202	27	38	61
MA 07	Ererê	inversa	149	50	177	46	166	17	71	14	303	67
MA 07	Ererê	sinistrógiro	256	78	339	29	308	18	185	58	47	25
MA 09	Ererê	sinistrógiro	251	80	165	23	132	25	319	64	223	2
MA 18	Monte Alegre	sinistrógiro	80	89	169	31	135	25	351	58	233	15
MA 18	Monte Alegre	sinistrógiro	266	81	351	28	319	19	192	60	57	21
MA 18	Monte Alegre	normal	62	80	355	70	277	62	148	18	51	20
MA 18	Monte Alegre	sinistrógiro	262	84	351	11	320	6	200	77	52	10
MA 18	Monte Alegre	sinistrógiro	262	85	351	6	321	2	211	82	51	7
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	33	89	303	2	333	1	96	87	242	1
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	42	88	129	50	172	43	313	39	61	20
MA 21	Penatecaua	sinistrógiro	96	85	6	4	335	5	134	83	245	2
MA 21	Penatecaua	sinistrógiro	100	85	189	9	158	5	38	79	249	8
MA 21	Penatecaua	sinistrógiro	238	80	148	3	118	7	254	79	27	7
MA 21	Penatecaua	inversa	251	87	337	47	298	37	163	42	48	24
MA 21	Penatecaua	sinistrógiro	262	89	166	5	136	4	340	84	225	2

MA 21	Penatecaua	sinistrógiro	265	89	355	18	323	15	178	71	56	9
PONTO	FORMAÇÃO	CINEM.	PLANO		ESTRIA		σ_1	σ_2		σ_3		
MA 31	Ererê	dextrógiro	184	80	103	41	136	28	263	47	29	28
MA 31	Ererê	dextrógiro	198	85	110	23	141	17	276	66	46	15
MA 31	Ererê	dextrógiro	183	88	93	14	123	11	265	75	31	8
MA 31	Ererê	dextrógiro	160	86	248	23	280	21	79	66	187	7
MA 31	Ererê	dextrógiro	6	86	277	12	307	8	77	77	215	9
MA 39	Penatecaua	normal	3	87	89	50	132	43	275	39	22	19
MA 39	Penatecaua	normal	9	84	94	40	132	37	286	49	32	13
MA 39	Penatecaua	normal	10	85	94	48	137	43	284	41	30	17

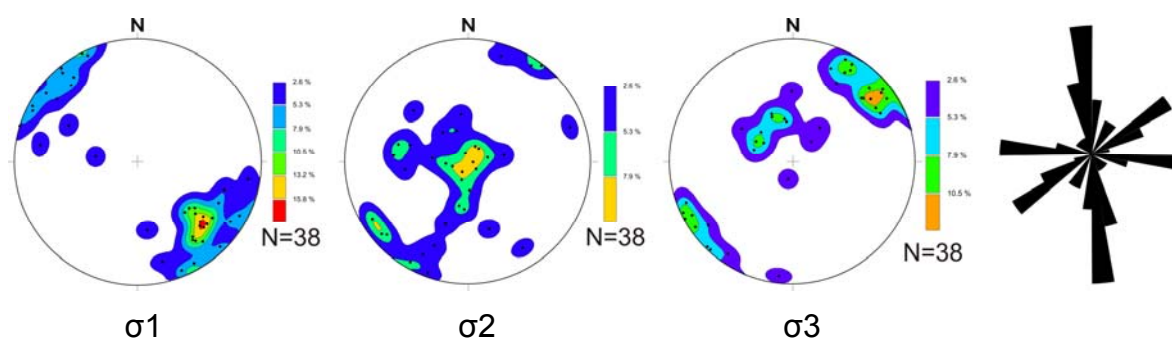
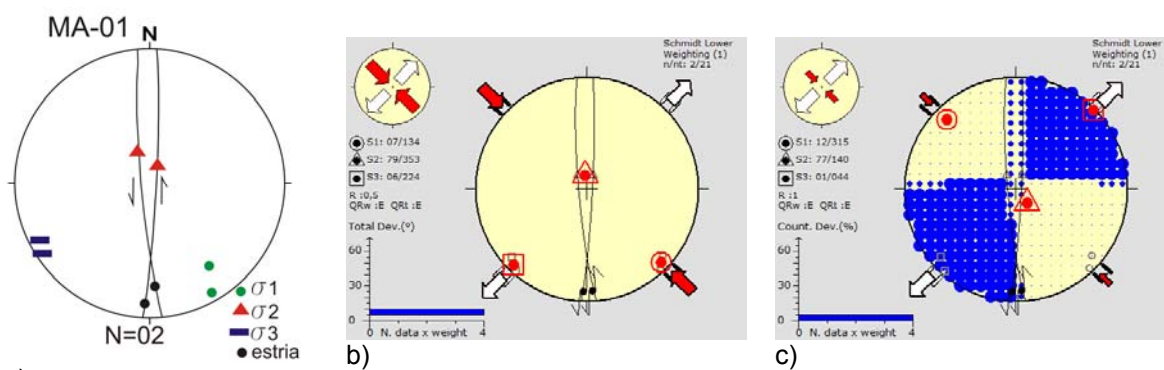


Figura 7.13: Diagramas sinópticos das paleotensões dos planos de falhas da Fase DN+1 (σ_1 , σ_2 e σ_3). Diagrama de rosetas das falhas correspondentes aos campos de tensão.

Nos arenitos / siltitos da Formação Ererê do ponto MA-01 situado na borda sudeste do DMA (54°4'54,09"W / 1°56'26,28"S), ocorrem duas falhas com direções N/S com cinemática sinistrógiro como visto na foto do afloramento e desenho esquemático Figura 7.14. Na Figura 7.15 os diagramas estruturais obtidos pelos programas Sigmas e Win_Tensor, mostram o campo de máxima tensão (σ_1) transcorrente extensional na direção NW/SE.



Figura 7.14: Foto em planta. Indicadores cinemáticos com movimentos sinistrógiros.



a) Figura 7.15: Diagrama estrutural do ponto MA-01. a) Diagrama feito no programa Sigmas com a indicação da falha e os respectivos σ_1 , σ_2 e σ_3 ; b) Campos de tensões feito no Win_Tensor com também o diagrama c) com representação dos diedros retos.

Nos siltitos da Formação Ererê (MA-03) descritos na borda leste do DMA ($54^{\circ}3'37,36''W$ / $1^{\circ}54'21,53''S$), observa-se uma falha transcorrente oblíqua com direção N-S com cinemática sinistrógiira / inversa. Como pode ser visto nos diagramas da Figura 7.16, o campo de máxima tensão (σ_1) é compressional na direção N70-80W/SE.

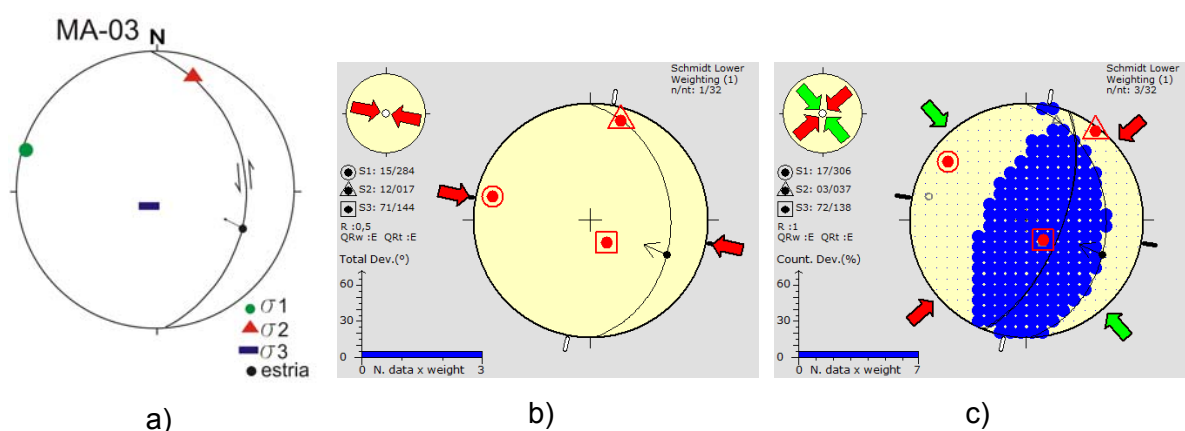


Figura 7.16: a) Diagrama estrutural do ponto MA-03, com os tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 e direção da falha sinistral / inversa; b) e c) diagramas estruturais que mostram a direção do campo de tensão.

No ponto MA-06, situado na borda leste do DMA, nas proximidades da PA-423, com coordenadas $54^{\circ}2'56,06''W$ / $1^{\circ}52'18,12''S$, ocorrem falhas inversas com direção NE/SW e dobras associadas como visto na Figura 7.18.

Os diagramas estruturais indicam falhas geradas em ambiente compressional com esforço principal SE/NW (Figura 7.17).

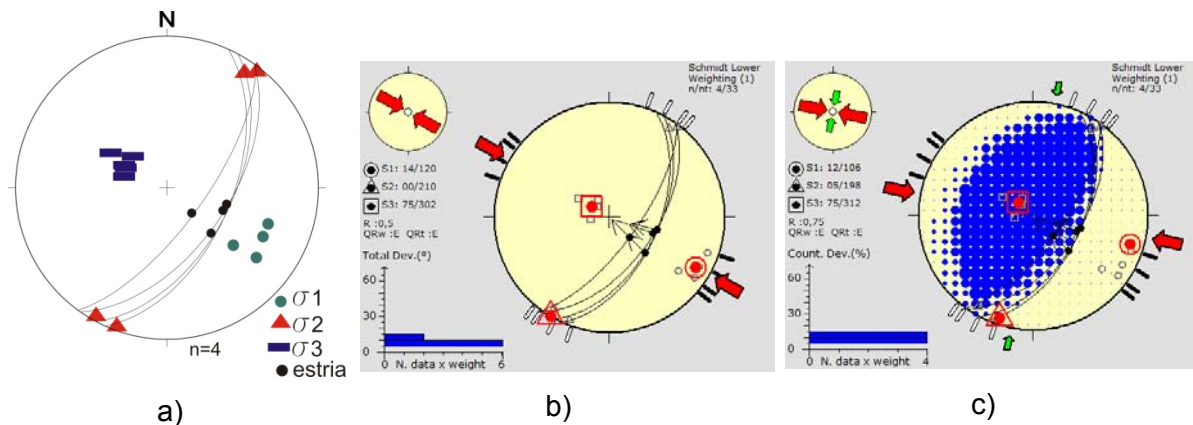


Figura 7.17: Diagramas realizados das falhas do ponto MA-06 que indicam um regime compressional.



Figura 7.18: Detalhe das dobras associadas à falha inversa. Coordenada do ponto 54°2'56,06"W / 1°52'18,12"S.

Nos siltitos da Formação Ererê, na borda sul do Domo de Monte Alegre (MA-07) com coordenadas 54°6'37,66"W/1°58'7,07"S, ocorre zona de falha inversa com componente oblíqua dextrógira que possui direção N70E (Figura 7.19) com a presença de inúmeros *kink bands* e dobras em caixa. Ocorre também falha com movimentação sinistrógira na direção NW-SE (Figura 7.20).

Os diagramas mostram que estas falhas foram geradas em ambiente compressional na direção N50W/SE.

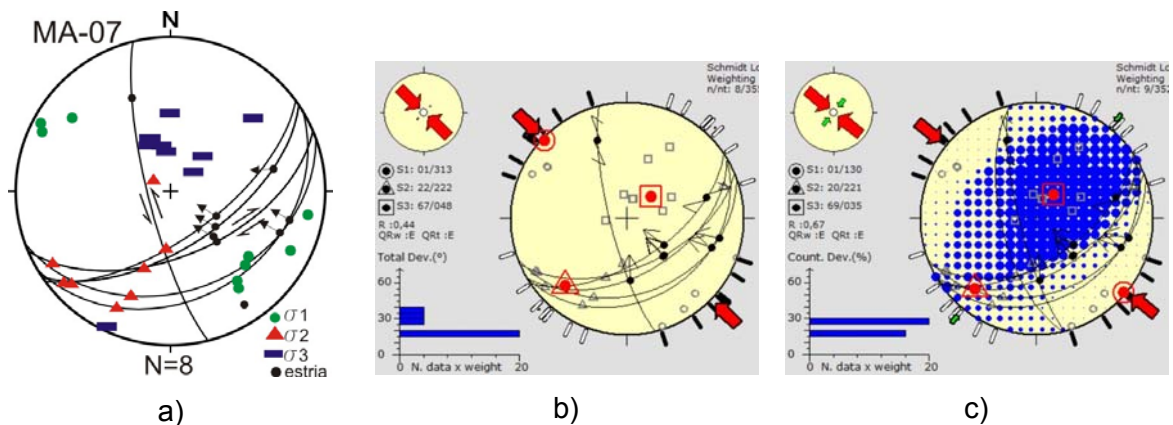


Figura 7.19: Diagramas estruturais realizados para as falhas do ponto MA-07 que mostram falhas geradas em regime compressional NW/SE.

Ainda no mesmo afloramento foram descritas diversas juntas, conforme apresenta o bloco diagrama e o diagrama de roseta.

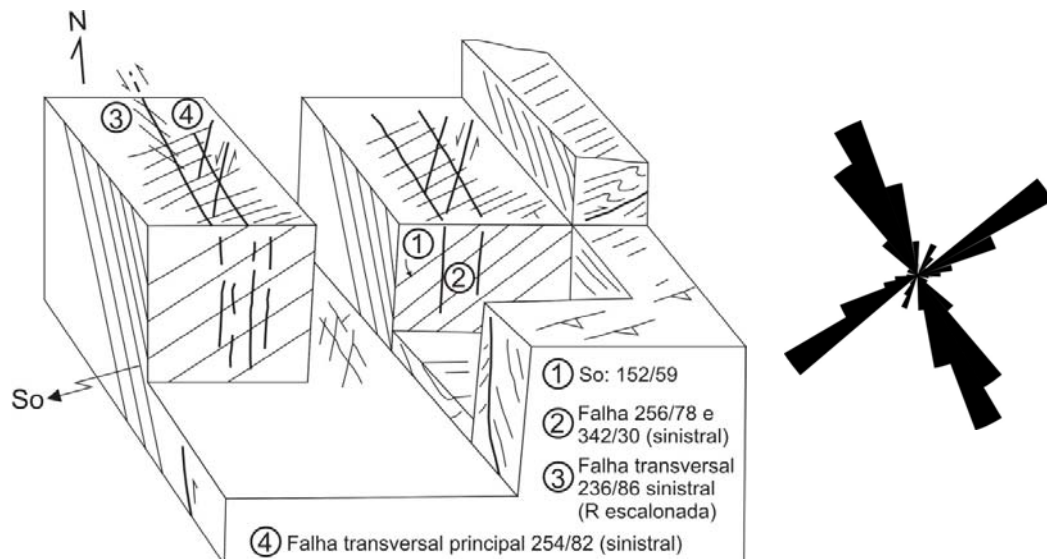


Figura 7.20: Blocodiagrama do ponto MA-07 com a localização das juntas e falhas.

Na região centro-sul, em estrada secundária que dá acesso à vila do Ererê, os siltitos da Formação Ererê, do ponto MA-09 ($54^{\circ}10'9,31''W/1^{\circ}59'31,6''S$) encontram-se segmentados por zona de falha, marcada por brechas com anomalia radiométrica. A zona brechada, que possui direção N-S, contém venulações de quartzo euédricos, de tamanho centimétrico e feições sigmoidais que sugerem movimento normal sinistrógiro (Figura 7.21).

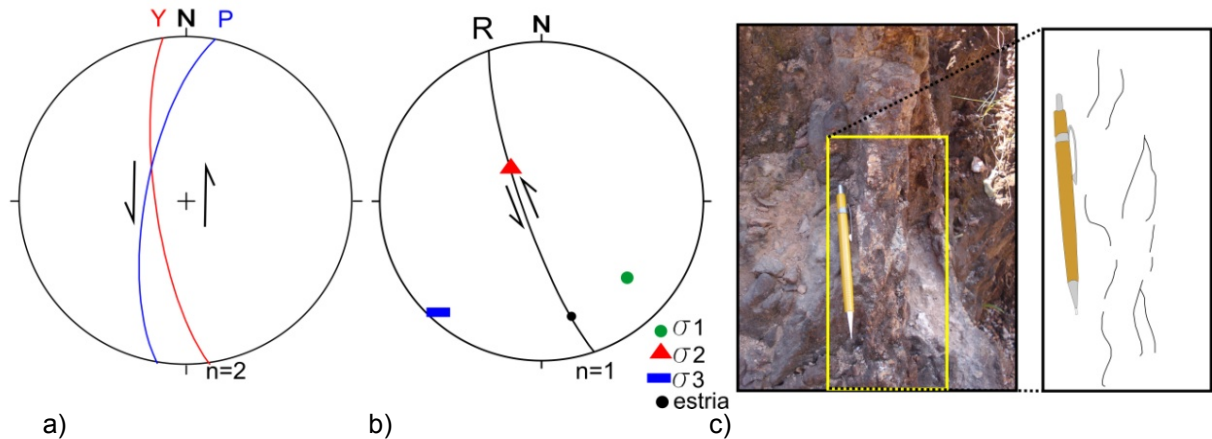


Figura 7.21: Diagramas estruturais do ponto MA-09, situado na porção centro-sul do DMA. a) Plano das juntas sinistróginas; b) Falha sinistrógrica e c) Foto e croqui da feição sigmoidal.

No ponto MA-18 mapeado na porção nordeste do domo ($54^{\circ}6'7,28''W/1^{\circ}49'33,27''S$) nos arenitos da Formação Monte Alegre ocorrem falhas sinistróginas na direção N-S e uma normal NW/SE que imprimem característica transcorrente (Figura 7.22).

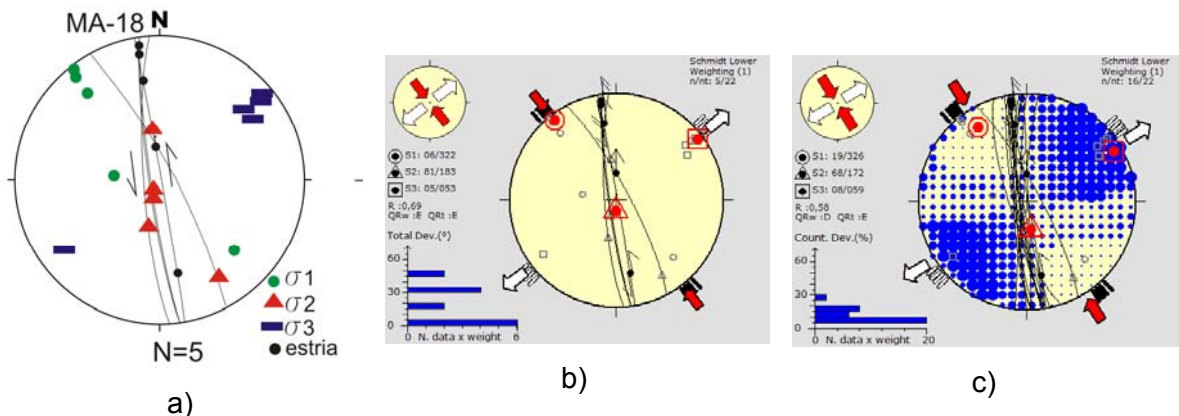


Figura 7.22: Diagramas estruturais do ponto MA-18 onde observa-se em a) Sigmas – diagrama dos campos de tensão e cinemática das falhas; b) e c) Win_Tensor diagramas com campos de tensão.

No ponto MA-31 situado sob a ponte da PA-255 ($54^{\circ}8'36,03''W / 1^{\circ}56'25,78''S$), foram descritas falhas transcorrentes E-W (Figura 7.23) que apresentam cinemática dextrógrica.

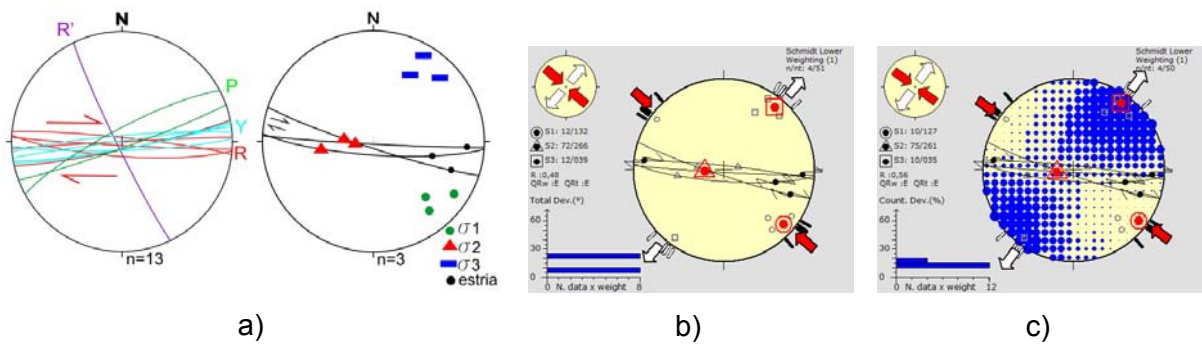


Figura 7.23: Diagramas estruturais do ponto MA-31. O diagrama (a) apresenta os planos *Riedel* das falhas dextróginas e o diagrama das falhas (b) e (c) campo de tensões.

Na borda oeste do Domo de Monte Alegre ($54^{\circ}17'47,8''W$ / $1^{\circ}55'28,36''S$) foram descritos gabros (ponto MA-39) com presença de um sistema de falhas em *relay*, alternando um escalonamento *right* e *left-step*, sugerindo movimento *down-dip* segundo a direção N70W (Figura 7.24), com cinemática predominante dextrógira (provável normal-dextrógira), os diagramas estruturais são apresentados na Figura 7.25.

Estas falhas foram geradas em um ambiente extensivo com componente oblíqua onde o principal campo de esforço é extensional na direção NE/SW, como mostra os diagramas realizados pelo Win_Tensor (Figura 7.25b e c).

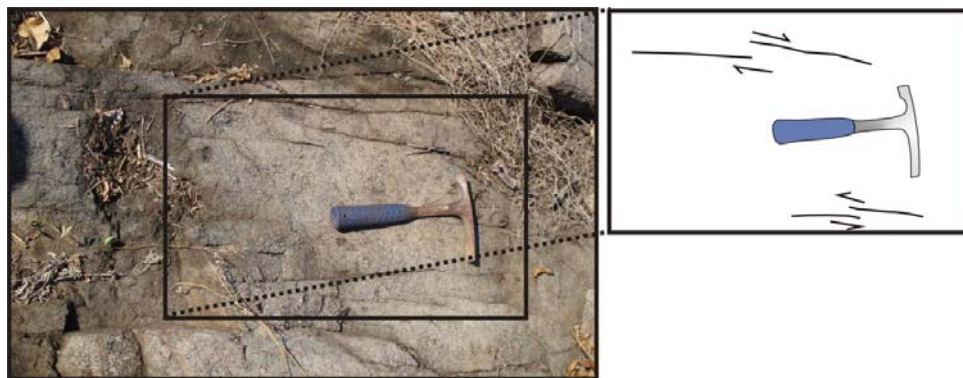


Figura 7.24: Padrão em *relay* alternando um escalonamento *right* e *left-step*.

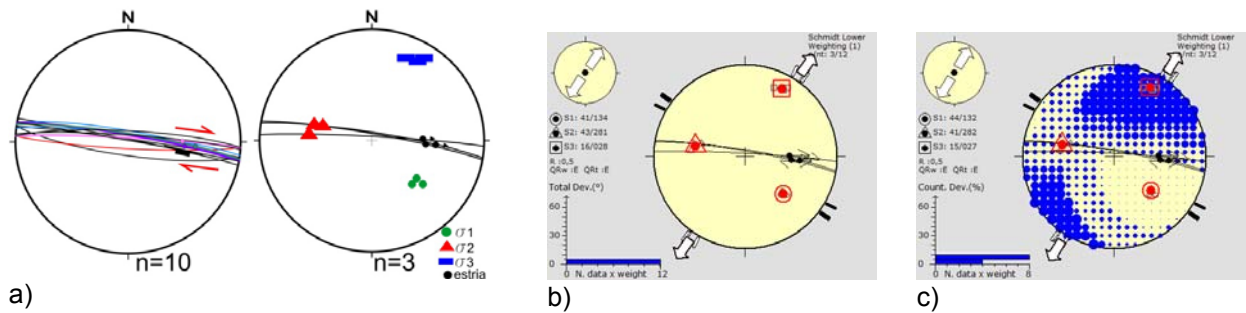


Figura 7.25: Diagrama dos planos de falhas estriados com cinemática normal dextrógiro à esquerda e os paleotensões à direita.

No ponto MA-21 que representa a pedreira Três Bocas, foram encontradas duas famílias principais de fraturas. As relações geométricas entre estas fraturas permitiu definir a hierarquia entre as mesmas e a mais antiga é cortada pela mais recente em diversos pontos mapeados como é possível ser visualizado na Figura 7.26 e Figura 7.27.

Outro fator que as diferem é sua característica de deformação, já que as fraturas da fase DN+1 apresentam características compressoriais por ocorrerem zonas de cisalhamento intenso, enquanto as fraturas da fase DN+2 apresentam, na sua maioria, preenchimento de quartzo e outros minerais, ou seja, apresentam componentes extensionais.

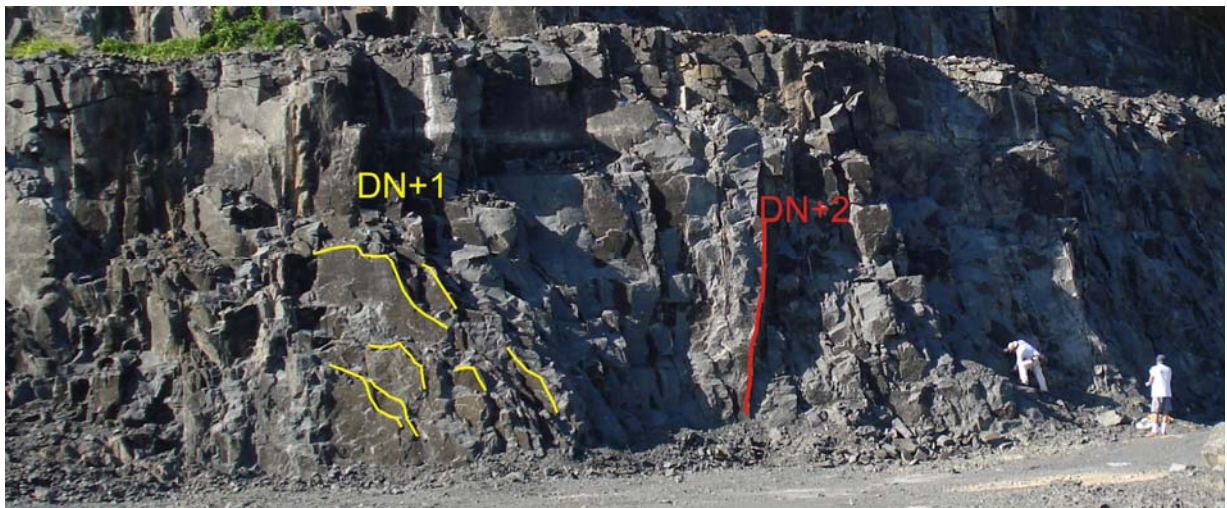


Figura 7.26: Vista geral do afloramento da pedreira (MA-21) onde se pode visualizar a relação geométrica entre as fraturas.

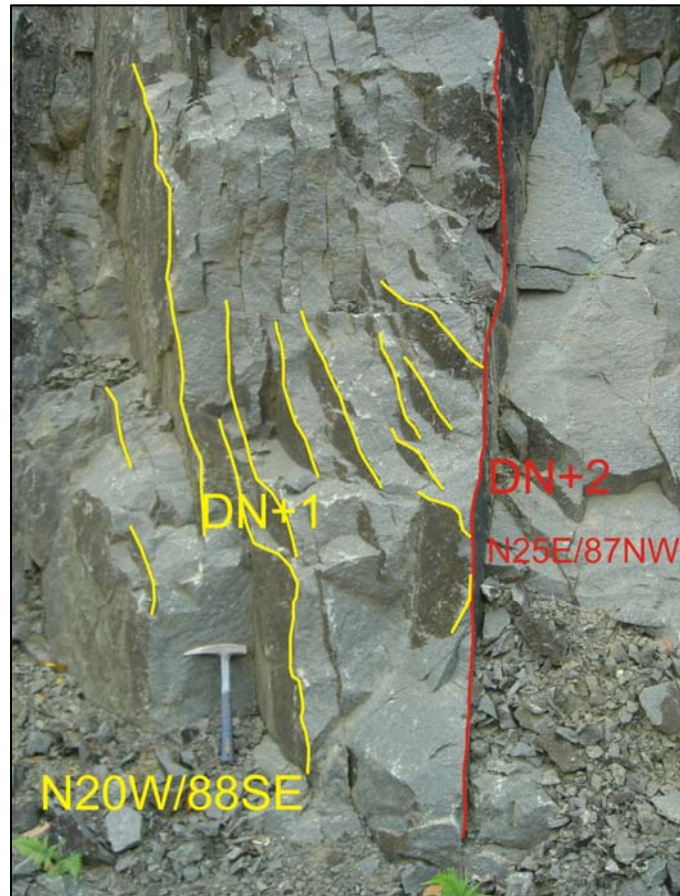


Figura 7.27: Detalhe do afloramento do ponto MA-21 onde pode-se observar a relação entre as falhas cisalhantes pertencentes à fase DN+1 e às falhas da fase DN+2 que cortam a anterior.

Ainda na pedreira do ponto MA-21, o levantamento estrutural de campo permitiu reconhecer zonas de cisalhamento cataclástico com planos de fraturas internos sub-paralelos, conforme mostra a Figura 7.28. A principal direção dos planos de fraturas medidos estão à N-S apresentado pelas rosetas.



Figura 7.28: Zonas de cisalhamento cataclástico identificados nas rochas da pedreira Três Bocas, no ponto MA-21. O diagrama de rosetas indica que a principal direção dos planos encontra-se orientado à N-S.

A deformação (DN+1) encontrada nas rochas pertencentes ao intervalo que vai desde o Devoniano até o Carbonífero, conforme as informações apresentadas se resumem por um regime transcorrente/compressional com sua tensão máxima aproximada na direção N45W/SE conforme diagrama apresentado na Figura 7.13.

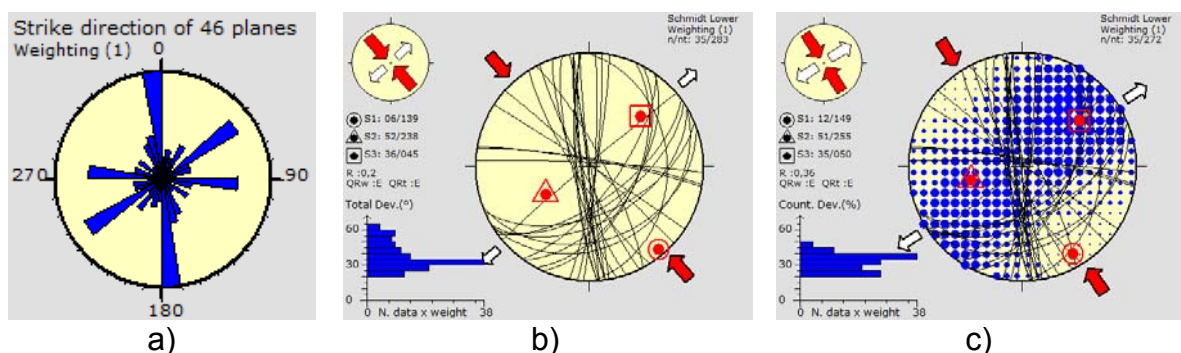


Figura 7.29: Diagramas estruturais das fraturas das rochas entre o Devoniano e o Carbonífero realizados pelo Win_Tensor. a) Roseta das principais direções das falhas; b) Diagrama com campo de tensão e c) diedros retos. Estes diagramas permitiram identificar, nos diagramas (b) e (c) que o campo máximo de tensão σ_1 está posicionado no quadrante SE.

Já os diagramas obtidos pelo Win_Tensor apenas para as falhas identificadas nas rochas ígneas do Penatecaua, as direções dos planos destas tendem a ser N-S como apresentadas na Figura 7.30, com vetor de tensão e o campo de tensão máximo à N20W-SE e σ_1 no quadrante NW.

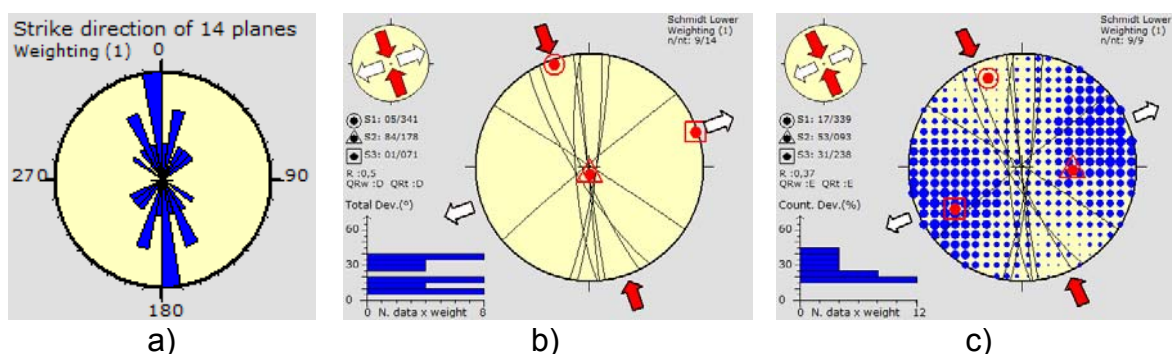


Figura 7.30: Diagramas estruturais realizados pelo Win_Tensor. a) Roseta das principais direções das falhas; b) Diagrama com campo de tensão e c) diedros retos. Estes diagramas permitiram identificar, nos diagramas (b) e (c) que o campo máximo de tensão σ_1 está posicionado no quadrante SE.

FASE DN+2

Como já comentado na fase anterior, as fraturas mapeadas nas rochas magmáticas do Penatecaua para a fase DN+2 diferem das demais por apresentar preenchimento mineral com cristais euédricos e por vezes dispostos em fibras perpendiculares às direções dos planos das fraturas. Foi mapeado uma falha no arenito da Formação Alter do Chão.

Para o sistema de fraturas DN+2 o sentido da paleotensão máxima σ_1 difere do sistema anterior pelo fato de se encontrar na direção N45E, coincidindo com planos de fraturas abertos e preenchidos quase sempre por calcita. O σ_2 , por sua vez, continua essencialmente na vertical, com alguma dispersão, e por fim as medidas de σ_3 apresentam direções NW-SE.

Os diagramas com a representação real destes campos de tensão e a roseta destas falhas são vistos na Figura 7.31. A Tabela 7.3 (páginas 127 e 128) apresenta um resumo dos planos, as estrias e os respectivos tensores.

Tabela 7.3: Medidas dos planos de falhas e os tensores respectivos para a fase DN+2.

PONTO	FORMAÇÃO	CINEM.	PLANO		ESTRIA		σ_1		σ_2		σ_3	
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	57	89	327	6	357	4	137	83	266	3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	108	85	18	3	47	0	138	84	317	5
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	110	88	20	3	49	1	166	86	319	3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	142	88	232	10	201	7	63	79	292	6

MA 21	Penatecaua	dextrógiro	111 83	21 7	50 2	156 80	320 9
PONTO	FORMAÇÃO	CINEM.	PLANO	ESTRIA	σ_1	σ_2	σ_3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	111 80	22 6	51 0	142 78	321 11
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	112 85	22 4	51 0	150 83	321 6
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	112 89	202 3	232 3	40 86	142 0
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	120 85	31 15	61 10	192 74	329 11
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	132 89	42 7	72 5	213 82	341 4
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	136 89	46 6	76 4	216 83	345 3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	141 65	228 8	256 19	121 63	352 17
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	149 89	59 3	89 2	220 86	358 2
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	244 85	329 45	10 40	158 44	265 16
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	254 89	344 12	14 10	168 77	283 5
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	266 80	177 6	206 0	297 78	116 11
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	274 89	184 5	214 3	352 84	123 3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	281 89	11 9	41 8	197 80	310 3
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	288 86	18 5	48 6	236 83	138 0
MA 21	Penatecaua	dextrógiro	320 88	50 5	19 3	251 84	110 4
MA 42	Alter do Chão	dextrógiro	277 85	190 29	222 22	358 60	124 18

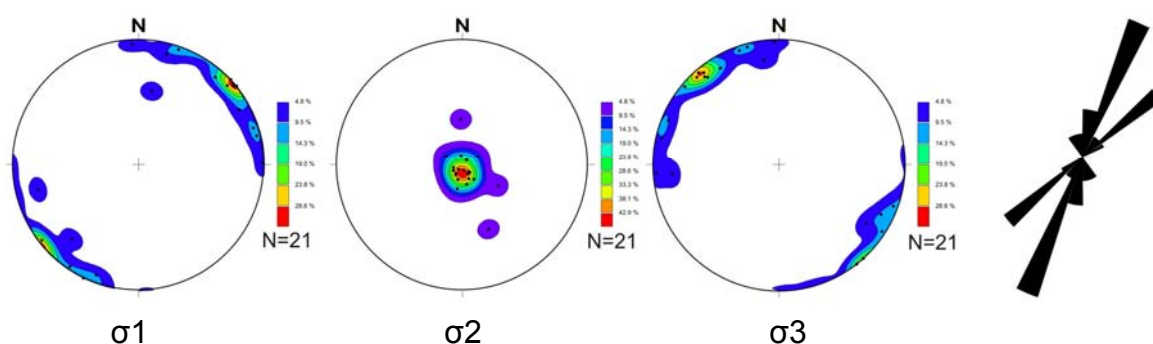
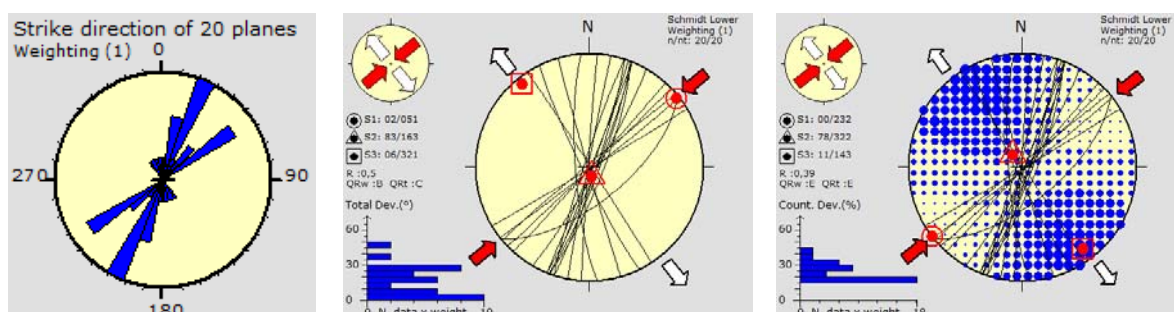


Figura 7.31: Diagramas sinópticos das paleotensões dos planos de falhas da Fase DN+2 com as rosetas dos planos de falhas correspondentes.



a) b) c)
Figura 7.32: Diagramas estruturais obtidos pelo Win_Tensor. a) Roseta das principais direções das falhas; b) Diagrama com campo de tensão e c) diedros retos. Estes diagramas permitiram identificar, nos diagramas (b) e (c) que o campo máximo de tensão σ_1 está posicionado no quadrante NE.

As falhas mapeadas nesta fase de deformação foram também identificadas nas rochas intrusivas na pedreira Três Bocas da empresa Fidens mapeada como ponto MA-21.

Esta fase é representada por falhas planares, lisas a rugosas, também métricas a decamétricas, porém menos densas que da fase DN+1. Em geral são abertas e em muitos casos estão preenchidas por minerais euédricos de calcita, calcopirita e quartzo, cujo crescimento é fibroso orientado de forma perpendicular ao plano da fratura Figura 7.33 (a) e (b). A direção preferencial deste sistema está em torno de N20E, havendo fraturas conjugadas subsidiárias de direção N50E.

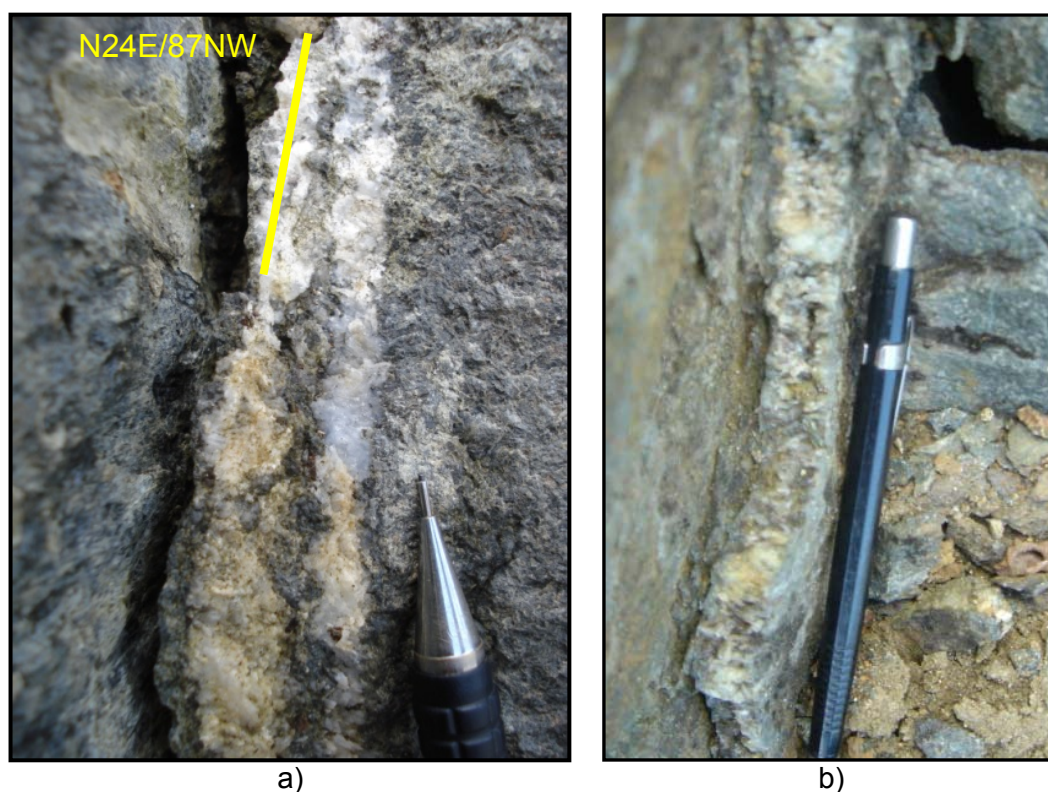


Figura 7.33: a) Falhas nas rochas ígneas da pedreira Três Bocas mapeadas como ponto MA-21, situado na região centro-leste do DMA que estão preenchidas por quartzo e b) crescimento de quartzo perpendicular à zona de falha.

Ainda nesta pedreira ocorre um padrão sistemático de fraturas e também diversos planos de disjunções colunares, com formas planares e anastomosadas, onde foram identificadas estrias e *steps* nas direções diversas (Figura 7.34).

As principais direções das falhas são N30E, onde foram observadas venulações (Figura 7.37) de quartzo, calcita e calcopirita (subordinada). Essas venulações acompanham uma zonação na matriz, apresentam feições de

intercrescimento nas bordas, quartzo cristalizado na porção ortogonal e quartzo + calcita euédrica. As direções N-S e NW-SE ocorrem com menor frequência como apresentado no diagrama de roseta da Figura 7.31.

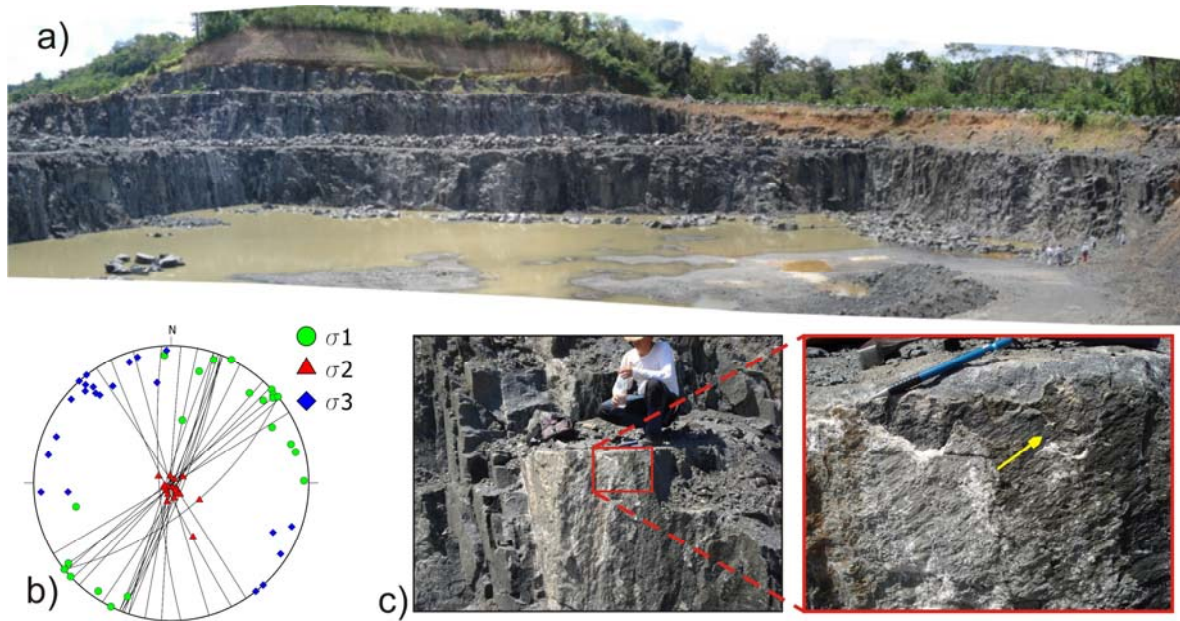


Figura 7.34: a) Vista geral do afloramento de rocha da pedreira Três Bocas (MA-21) com afloramentos de gabros e diabásio; b) Diagrama das paleotensões e c) um dos planos estriados e detalhe ao lado direito.



Figura 7.35: Fraturas com preenchimento de quartzo nas paredes e no interior ocorrem calcitas em fibras e calcopirita euédrica.

Algumas dobras foram observadas em rochas da Formação Ererê, especificamente no ponto MA-07 na borda sul do domo, formada por siltitos e argilitos acamadados em *sets* decimétricos a métricos (Figura 7.38a). Em geral são reclinadas ou normais, suaves a abertas, com eixos caindo para o quadrante SE. Não são observadas em todos os afloramentos da formação. A importância estrutural das mesmas se dá pelo fato de que seu posicionamento geométrico reforça o modelo de fraturamento aplicado à fase DN+2, visto que os eixos (Figura 7.38c) são coincidentes com o que se espera no modelo teórico (Figura).

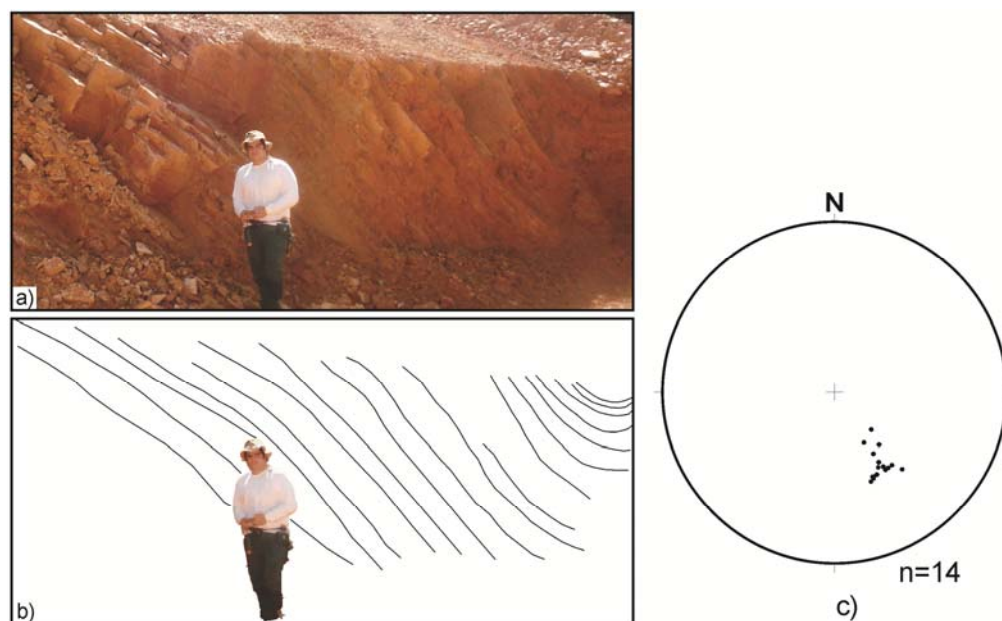


Figura 7.38: (a) Dobras reclinadas suaves a abertas em siltitos e argilitos da Formação Ererê (ponto MA-07); (b) desenho esquemático das camadas dobradas e (c) Diagrama de Schmidt (hemisfério inferior), com a posição dos eixos de dobras posicionados no quadrante SE, compatível com o modelo teórico de fraturamento da fase DN+2.

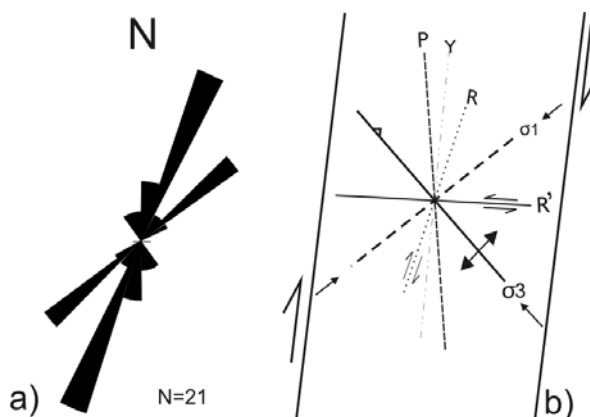


Figura 7.39: (a) Diagrama de roseta confeccionado com dados do sistema DN+2, mostrando a direção das fraturas cisalhantes; (b) Modelo de Riedel nas rochas ígneas na região do Domo de Monte Alegre relativos ao sistema de fraturas F2, com a direção de compressão máxima (σ_1) à N30E e direção principal das estruturas (Y) à N10E.

8 DISCUSSÃO

Ao longo do desenvolvimento do trabalho realizado na região de Monte Alegre, foi possível o estabelecimento da evolução do domo, por meio de análise morfoestrutural, caracterização geológica com enfoque no reconhecimento da estratigrafia e quase que essencialmente no levantamento estrutural das juntas e falhas para a determinação das fases de deformação.

Um dos principais focos deste estudo é a análise da deformação do Domo de Monte Alegre e não se pode fazer referência sem que seja mencionada sua gênese.

Observou-se que as principais estruturas encontradas devem-se, sobretudo ao fato de que estas estão relacionadas a um arqueamento crustal precursor que foi posteriormente deformado por atividades tectônicas em pelo menos dois eventos tectônicos distintos.

Com o objetivo de facilitar o entendimento destes eventos de deformação, responsáveis pela geração de diversos tipos e direções de estruturas, procurou-se criar uma subdivisão em fases de deformação. Tal divisão baseia-se nas mudanças sofridas pelo tensor principal σ_1 e nas mudanças de orientação todas as estruturas decorrentes.

Desta forma, a sequência do texto procura expor cada uma destas fases de deformação, sua correlação com o processo de geração do domo, as principais estruturas e evidências encontradas.

Como já mencionado, o levantamento dos dados estruturais foi realizado apenas na região mapeada do Domo de Monte Alegre, e desta forma este trabalho teve como contribuição a definição das fases de deformação apenas para esta região. Assim definiu-se a hierarquização destes eventos, com a nomenclatura de DN+(n°).

Neste levantamento a fase **DN** marca o início do arqueamento crustal, com idade estimada no Triássico que, ao final dos processos magmáticos impostos, resultaram em uma forma dômica inicial. Este evento possivelmente deve ter afetado uma faixa com direção NE, paralelo à direção encontrada no mapa gravimétrico Bouguer, porém apenas na região de Monte Alegre é que o

relevo se destacou em conformação dômica e elevada.

As análises morfoestruturais realizadas neste trabalho mostram que o Domo de Monte Alegre é delineado por serras homoclinais dispostas sob a forma de meio-círculos. No mapa de declividade pode-se constatar que os maiores desníveis estão presentes nas bordas (Figura 5.2).

A região central do domo trata-se de uma superfície erodida com altitudes máximas de até 50m enquanto que nas bordas são verificadas as maiores altitudes como a Serra do Itauajuri com 400m

Na análise de drenagens foi identificado que a região compreendida pelo Domo de Monte Alegre apresenta uma anomalia de drenagem anelar centrípeta (Figura 8.1).

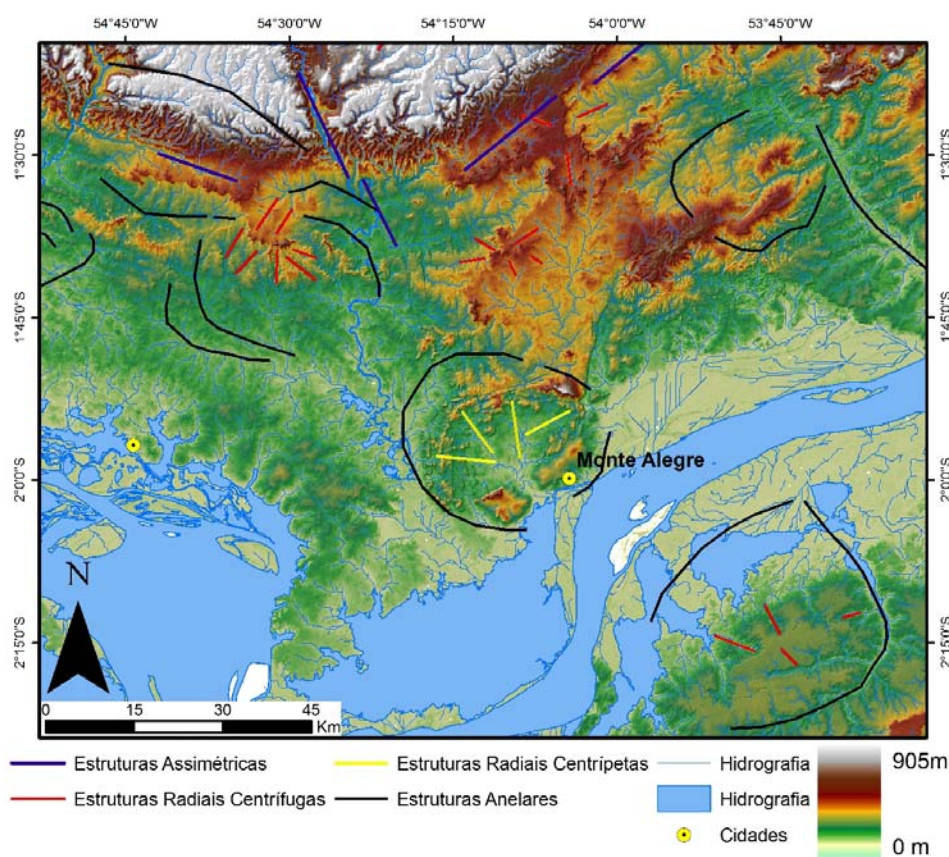


Figura 8.1: Modelo digital do Domo de Monte Alegre com sobreposição da drenagem e a interpretação das anomalias de drenagem. No domo ocorre uma anomalia anelar centrípeta.

Como já mencionado acerca da fase **DN**, o conceito é que o Domo de Monte Alegre teve uma contribuição magmática na sua gênese.

Esta contribuição magmática como precursor da conformação do Domo, pode ser comparada aos estudos das deformações de rochas sedimentares induzidas por intrusões magmáticas realizados por Conceição *et al.* (1993). Neste

trabalho são descritas geometrias das rochas ígneas intrusivas como diques, *sills*, lacólitos, bismálitos, lopólitos, facólitos, batólitos e estruturas dômicas. A Figura 8.2 apresenta um exemplo de estruturas formadas por arqueamento das camadas sedimentares sobrepostas, amoldando-se à forma geral de lente plano-convexa de lacólitos.

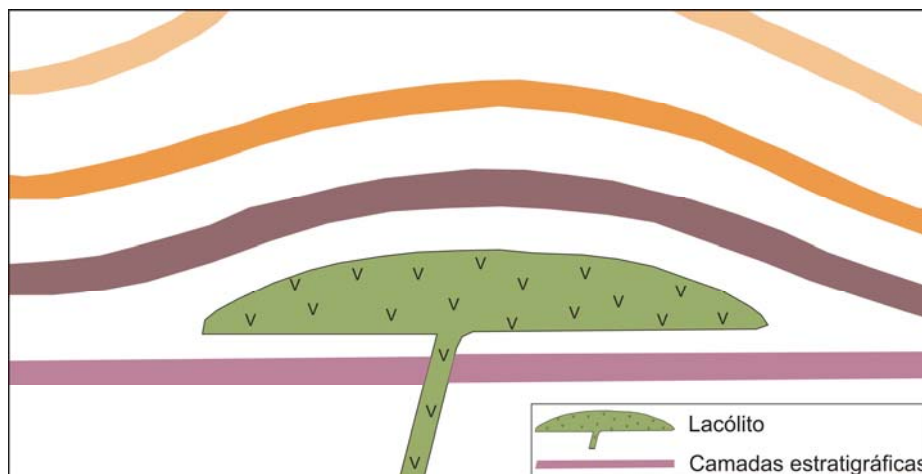


Figura 8.2: Seção esquemática de um lacólito, ilustrando a geometria plano-convexa. Modificado de Conceição *et al.* (1993).

Conforme o modelo proposto por Conceição *et al.* (1993), os estratos imediatos acima da intrusão adquirem mergulho divergente em todas as direções, sofrendo deslocamento máximo onde o lacólito é mais espesso que geralmente encontra-se na parte central do magmatismo. Nas bordas da intrusão, o deslocamento dos estratos é menor, porém o campo de esforços pode gerar fraturas, que eventualmente podem estar preenchidas por magma. Em mapas de contorno estrutural, essa feição traduz-se por estrutura circular (Figura 8.3).

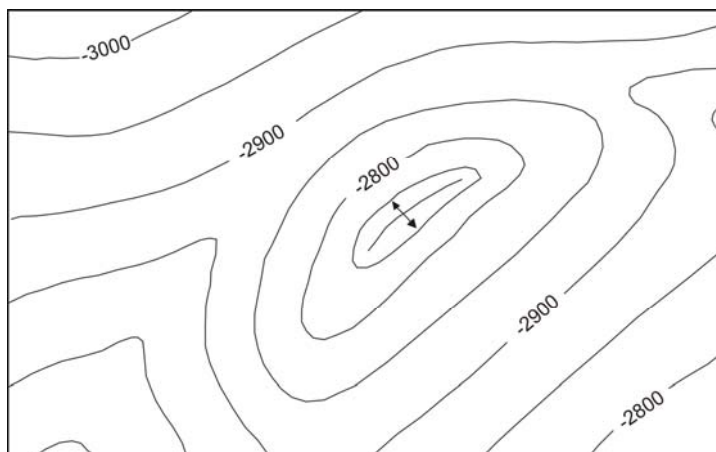


Figura 8.3: Mapa de contorno estrutural, esquemático ilustrando uma estrutura dômica associada à intrusão de lacólito. Modificado de Conceição *et al.*(1993).

O Domo com falhas reversas é considerado uma variação da estrutura dômica em forma de lacólito, onde o arqueamento dos estratos foi acompanhado pelo surgimento de falhas reversas semicirculares (CONCEIÇÃO *et al.*, 1993) como visto na Figura 8.4.

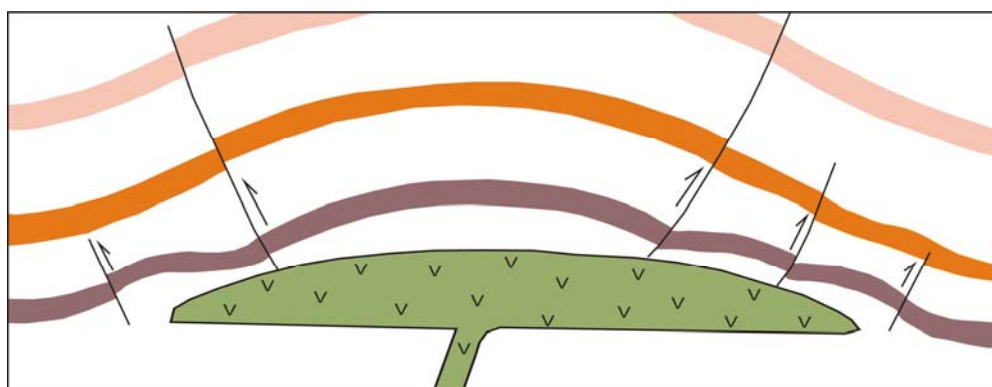


Figura 8.4: Lacólito com domo e falhas reversas. Modificado de Conceição *et al.*(1993).

Conceição *et al.* (1993) apresenta mapas de contorno estrutural onde os domos com falhas reversas são caracterizados por estruturas circulares ou elípticas fechadas, limitadas em quase todas as direções por falhas reversas semi-circulares (Figura 8.5).

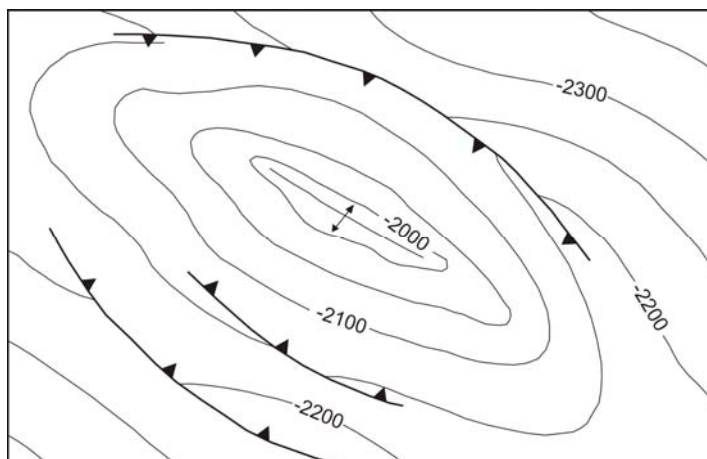


Figura 8.5: Mapa de contorno estrutural esquemático, ilustrando uma estrutura em domo com falhas reversas, associada à intrusão de um lacólito. Modificado de Conceição *et al.* (1993).

Estes modelos apresentados e explicados por Conceição *et al.* (1993), serviram como suporte ao entendimento para esta Tese que é possível que o arqueamento precursor do Domo de Monte Alegre (DN) esteja diretamente relacionado a um intumescimento sub-crustal de origem ígnea, que seria o grande “motor” dos processos tectono-estratigráficos identificados na área mapeada. Este intumescimento deformou as camadas sobrejacentes e possivelmente nucleou falhas reversas para as bordas da estrutura (Figura 8.6). Estas falhas nucleadas podem ter sido reativadas em eventos posteriores.

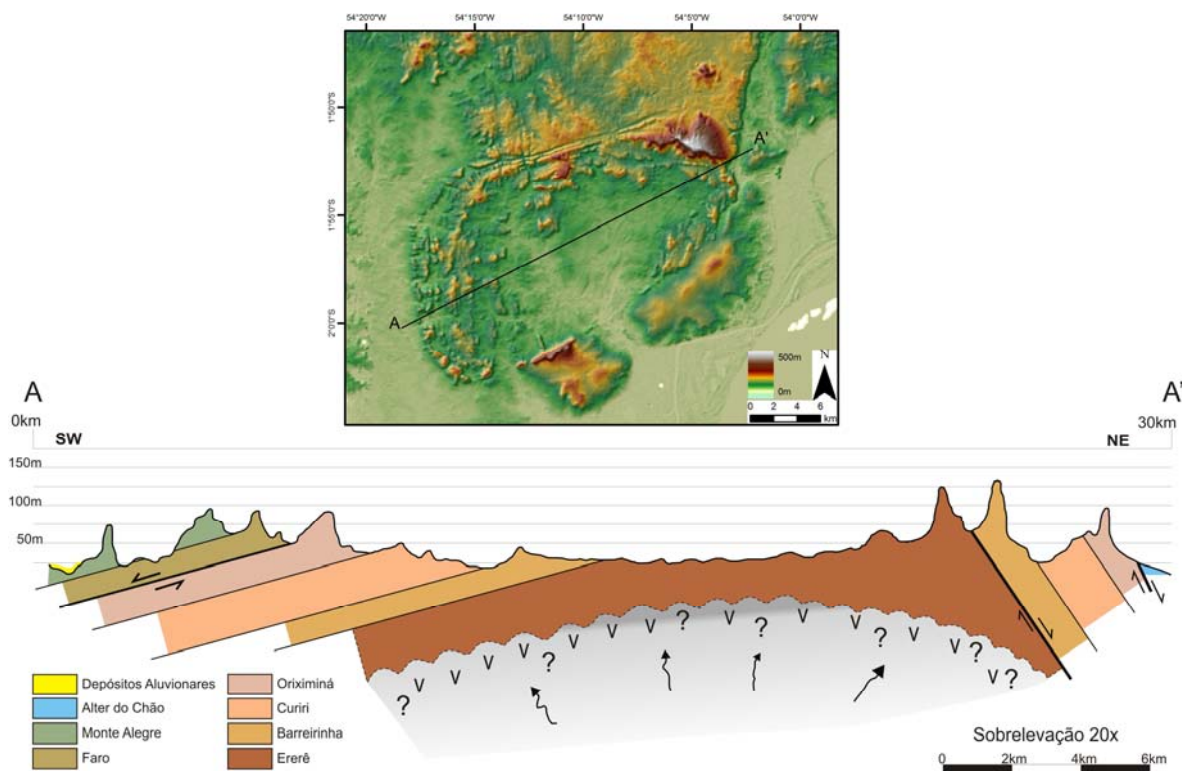


Figura 8.6: Perfil esquemático da seção SW/NE, do Domo de Monte Alegre.

Após a implantação do corpo magmático, o intumescimento das camadas, resultou em uma estrutura circular, quando visto em planta, com topografia levemente mais elevada. A dissecação do relevo resultou em drenagens radiais centrípeta, identificadas nos levantamentos morfoestruturais desta Tese, caracterizam de fato o domo.

Ainda que plausível a abordagem da gênese estar associada ao *hot spot*, como proposto por Morgan (1983), os estudos apresentados nesta Tese, consideram ao soerguimento precursor da estruturação dômica inicial, um arqueamento inicial proveniente de intumescimento crustal vinculado ao magmatismo do Penatecaua do Triássico/Jurássico.

Vários elementos apresentados neste estudo corroboram que a origem do domo tenha profunda relação com soerguimento motivado por uma anomalia infra-crustal de origem magmática. Dentre eles destaca-se a presença de águas termais (Fonte termal Menino Deus, na região central do domo), veios de quartzo hidrotermais (ponto MA-21), falhas com material radioativo remobilizados (pontos MA-09 e MA-32), diques de composição intermediárias (gabros – pontos MA-21, MA-39) e principalmente a presença de anomalias gravimétricas alinhadas com orientação NE/SW conforme a imagem da Figura 8.7

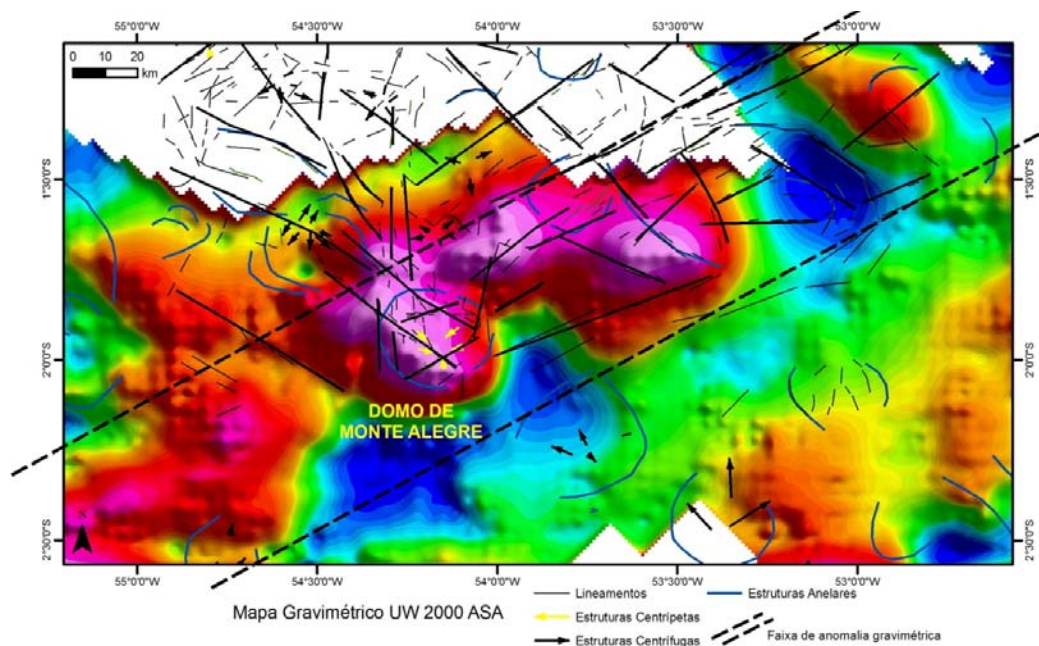


Figura 8.7: Mapa Gravimétrico ASA com a sobreposição de anomalias de drenagem, lineamentos e fraturas. Na faixa NE tracejada pode-se observar um alinhamento de domos gravimétricos. Mapa Gravimétrico modificado de Bongioiolo (2011).

Após o evento magmático com alçamento de rochas subcrustais a região foi submetida a pelo menos dois esforços tectônicos distintos, que deformaram a estrutura dômica em forma de braquianticlinal que é sua conformação atual. A estruturação em forma de braquianticlinal foi relatada por diversos autores tais como Montalvão & Oliveira (1975), Pastana (1999) e Almeida & Pinheiro (2007).

A fase de deformação **DN+1** identificada no mapeamento estrutural realizado nesta Tese, apresenta tensão máxima de esforços com direção N45W/SE e o campo do σ_1 está posicionado no quadrante SE do diagrama estrutural, como apresentado na Figura 7.29.

Esta fase de deformação está associada ao Diastrofismo, também chamado de Tectônica Juruá, bem definido na Bacia do Solimões, é caracterizado por esforço compressivo no quadrante NW-SE que criou zona de cisalhamento dextrógira na direção N75E (CAPUTO, 1985) como apresenta a Figura 8.8.

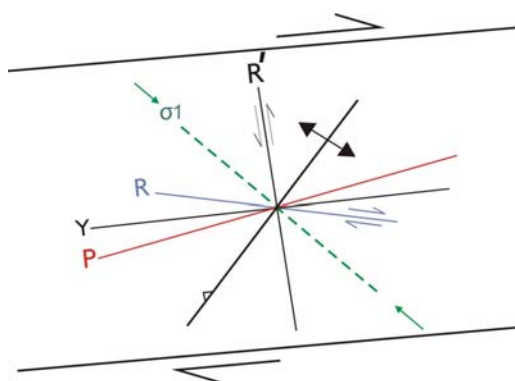


Figura 8.8: Modelo de Riedel dos levantamentos de campo realizado na região do Domo de Monte Alegre da fase DN+1, com a direção de compressão máxima (σ_1) à NW e direção principal das estruturas à ENE/WSW.

O evento tectônico mesozóico, denominado por autores (e.g. CAPUTO 1985; SZATMARI, 1983), de Tectônica Juruá e por outros de Orogenia Juruá. Caputo (1985) descreve esta tectônica com notável distribuição na Bacia do Solimões, onde é caracterizado por alinhamentos de anticlinais assimétrico, porém não se apresenta de maneira conspícua na Bacia do Amazonas. Nesta bacia, o tectonismo de idade mesozóica resultou na formação de falhas relativamente pequenas e isoladas, de natureza predominantemente transcorrente, orientados nas direções NE-SW e ENE-WSW.

Campos & Teixeira (1988), a partir da integração de dados de aeromagnetometria, gravimetria, morfo-estrutural e sísmica, identificaram na

região entre os rios Tapajós e Xingú, um alinhamento estrutural de caráter compressional com direção N65E, e aparentemente, segundo eles, teriam a mesma idade das estruturas compressivas que ocorrem na região do Alto Amazonas, na Bacia do Solimões.

Conforme o trabalho realizado por Caputo (1985), a análise das deformações do Diastrofismo Juruá geraram um sistema de falhas transcorrentes de direção geral N75E. Ainda neste trabalho o autor descreve que as falhas com direção N75E mostram indicações de efeitos de compressão do quadrante NW que é compatível aos encontrados neste estudo. As falhas do sistema N65E a N25E formam conjuntos de dobras assimétricas e falhas inversas e mostram fortes efeitos de compressão e grande rejeito (500 a 1.000m) verificado em linhas sísmicas. Já as falhas do sistema N70W são interpretadas como falhas secundárias.

Ainda Caputo (1985) atribui à origem do Diastrofismo Juruá que nas proximidades da região noroeste da América do Sul, desde o Eopaleozóico, existiam arcos de ilhas com atividade tectônica intermitente. Do fim do paleozóico ao Mesojurássico, os focos magmáticos situavam-se aparentemente, em arcos de ilhas afastados do continente devido à presença de uma bacia retro-arco marginal, associada a arco de ilhas. No fim do Jurássico, ou início do Cretáceo, deve ter havido colisão entre o arco de ilhas e o continente sul-americano, desaparecendo a bacia marginal. A rápida convergência causou a subducção da bacia marginal e a extremidade da placa continental colide com o arco magmático. Nestas condições os esforços compressivos gerados afetaram diretamente a crosta continental sul-americana, estendendo seus efeitos por grandes distâncias, dentro do continente, por um tempo relativamente curto.

Porsche (1985) foi o primeiro a fazer um estudo mais detalhado da zona de dobramentos do Juruá. A partir da análise estrutural das dobras e falhas, e resultados de modelagem física, estabeleceu que o desenvolvimento dessa zona de dobramentos foi a partir de uma zona de transcorrência dextrógira originada pelo deslocamento oblíquo dos blocos crustais adjacentes em escala regional, com forte componente transpressional (Figura 8.9).

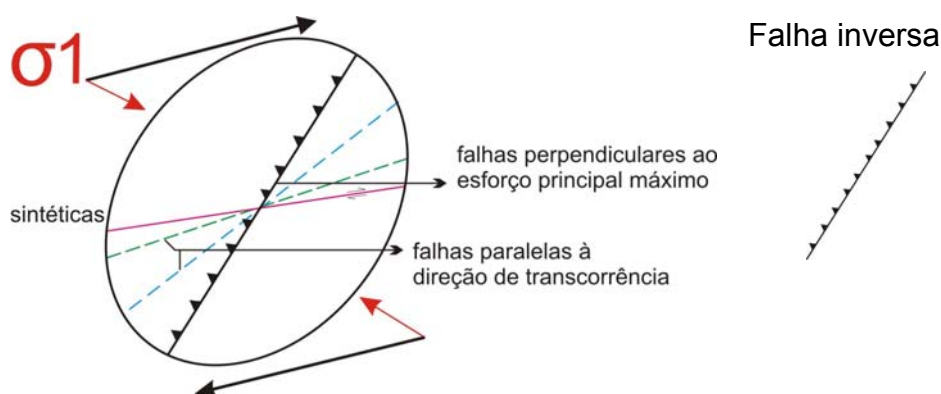


Figura 8.9: Elipsóide de deformações da área do Juruá com os tipos de falhas identificados (modificado de Porsche, 1985).

A abertura do Atlântico Sul, desde o Eocretáceo até o presente deu-se segundo um ângulo de 55° (LE PICHON *et al.*, 1973). Em relação à cadeia meso oceânica, a América do Sul girou um ângulo de 30° em sentido horário, desde a abertura inicial do Oceano Atlântico Sul até o presente. Isto fez com que todo o sistema de falhas Juruá, já instalado, girasse cerca de 30° no mesmo sentido.

A constatação feita por Caputo (1985) a respeito deste giro horário de 30° pode ser a razão do giro entre as direções compressivas iniciais identificadas neste estudo, conforme o diagrama da Figura 8.10.

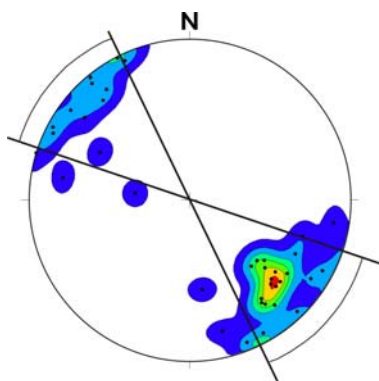


Figura 8.10: Diagrama estrutural do campo de tensão máxima σ_1 proposto para a fase DN+1 do levantamento estrutural do Domo de Monte Alegre.

No Domo de Monte Alegre, este evento de deformação teria sido responsável por diversas estruturas como grandes falhas inversas de direção N30E, falhas transcorrentes sinistróginas N-S, falhas transcorrentes dextróginas NW-SE e algumas falhas normais N80W, como apresentado anteriormente compatíveis com o modelo de Riedel (Figura 8.8). Nas rochas da Formação

Ererê, posicionadas na borda sul do domo (ver ponto MA-07 Figura 7.7) ocorrem falhas transcorrentes dextróginas com componente oblíqua inversa, atitude média de N70E/60NW cuja direção é comparável às direções traçadas em imagens aéreas e orbitais, que por sua vez revelam forte alinhamento estrutural. Esta direção foi comparada ao sistema Y do modelo de Riedel (Figura 8.8), assim como as falhas rúpteis inversas com direção N30E/60NW (ponto MA-06 na Figura 7.7), igualmente compatíveis com o referido modelo.

As falhas que ocorrem na fase DN+1 com direção variável entre N65E a N25E devem ter sido provocadas pela mesma deformação que resultou em um conjunto de dobras assimétricas e falhas inversas, inclusive aquelas com grande rejeito (500 a 1.000 m) verificado em linhas sísmicas (CAPUTO, 1985), e que constituem a deformação finita resultante do forte efeito compressivo na direção NW/SE do primeiro evento de deformação que afetou o Magmatismo Penatecaua.

Ainda nas análises realizadas no Domo de Monte Alegre em imagens, tanto em escala regional, quanto de detalhe, mostram a presença de dobras com atuação intensa na borda norte do DMA e um alongamento deste, sub-paralelo ao seu eixo maior. (Figura 8.11).

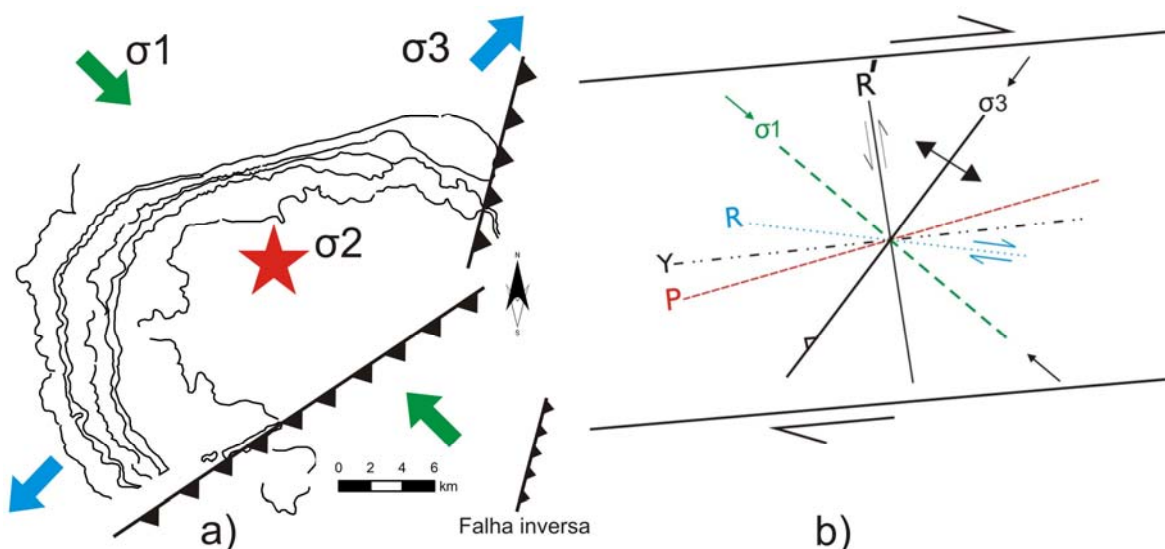


Figura 8.11: a) Representação esquemática atual da morfoestrutura do Domo de Monte Alegre, e os eixos de tensão principal (σ_1) e tensão mínima (σ_3) da primeira fase de deformação pós-Magmatismo Penatecaua; b) posição do modelo de fraturas Riedel referente a fase de deformação DN+1, com a direção de compressão máxima (σ_1) à NW-SE.

A fase de deformação **DN+2** é uma tectônica superimposta que provoca deformação na estrutura elipsoidal do domo resultante de um evento de

transpressional na direção NE/SW. Deduz-se, assim que o formato final da braquianticlinal possa ter advindo deste segundo processo de cisalhamento.

Os registros desta deformação foram medidos nas rochas intrusivas do evento Penatecaua, em zonas de falhas com direções preferenciais a NE-SW, com preenchimento de quartzo e por vezes calcita associada. Em alguns planos de falhas foram identificados quartzo euédrico com crescimento perpendicular à direção da falha. O campo de tensão máxima σ_1 encontra-se NE-SW, o σ_2 apresenta direções preferenciais na vertical e um σ_3 para NW-SE (Figura 8.12).

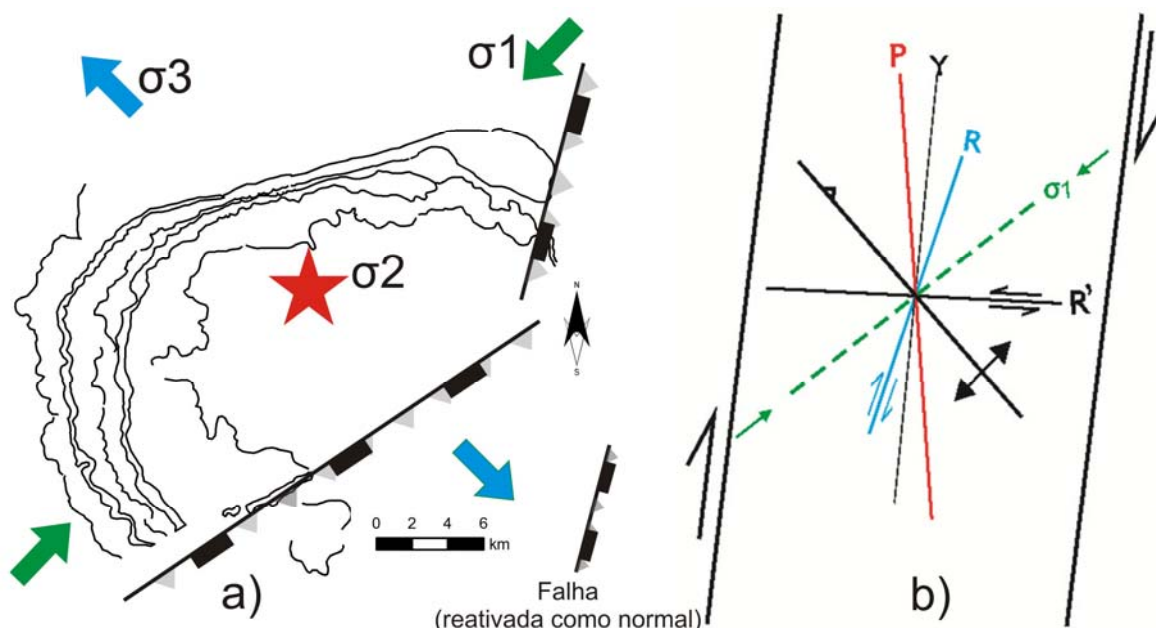


Figura 8.12: a) Representação esquemática atual da morfoestrutura do Domo de Monte Alegre, e os eixos de tensão principal (σ_1) e tensão mínima (σ_3) da segunda fase de deformação; b) posição do modelo de fraturas Riedel referente a fase de deformação DN+2, com a direção de compressão máxima (σ_1) à NE-SW.

Esta distensão representada pelo σ_3 e compressão σ_1 , pode ter reativado a falha inversa NE-SW da fase DN+1 como falha normal. Ao longo da zona de falha, foram encontrados arenitos da Formação Alter do Chão, deformados na serra do Ererê.

9 CONCLUSÃO

Apesar de constituir-se como uma das áreas mais interessantes para fins de pesquisas geológicas, geomorfológicas e arqueológicas, seja pela própria estruturação dômica ou por apresentar excelentes exposições de rochas paleozóicas, que, por estas mesmas razões, têm atraído a atenção de cientistas e pesquisadores de todo o mundo. Embora trabalhos tenham sido realizados na região do Domo de Monte Alegre, este ainda carece de campanhas de estudos mais regulares, que de certo modo, possam contribuir para um conhecimento científico mais detalhado desta intrigante região da Amazônia.

Conforme mencionado, os processos magmáticos tiveram papel precursor na geração do domo que foram posteriormente deformados por dois eventos e foram responsáveis pelas principais estruturas encontradas e discutidas nos capítulos anteriores.

Assim, acredita-se que a geração deste domo teve origem pelo arqueamento crustal do evento Penatecaua relacionado ao término dos esforços Gonduanides.

A caracterização morfológica do domo (ou da forma dômica) se dá pela presença de drenagens anelares radiais centrípetas, direções de acamamento com mergulhos para as bordas da estruturas e também pela sua conformação semi-elíptica vista em imagens orbitais e fotos aéreas.

Os levantamentos de campo e análise dos lineamentos de relevo mostram que esta área é cortada por pelo menos três direções de fraturas. Uma com direção NW/SE, a segunda com direção NE/SW e a terceira com direção N-S. Exatamente na região do domo ocorre a intersecção destas três direções que foram observadas nas análises dos lineamentos interpretados nas imagens orbitais (SRTM) e fotos aéreas.

Tendo por base a estruturação das rochas mapeadas, foi possível concluir que há ao menos duas fases de deformação rúptil-dúctil a rúptil. Na primeira fase (DN+1), posterior ao arqueamento magmático, em regime mais rúptil, ocorre um processo diastrófico onde predominam falhas fechadas ou com aberturas submilimétricas, com superfícies de ruptura mais lisas do que rugosas, planares e levemente anastomosadas, densas com extensão métrica a

decamétrica. Nos planos há formação abundante de estrias de atrito e *steps*, os quais definem movimento sinistrógiro. Há em menor grau cataclase e brechas, além de esparsos *gouges*. São frequentes as fraturas escalonadas sintéticas que interceptam as fraturas maiores e principais e foi identificada a tensão máxima de esforços na direção N45W/SE, com σ_1 posicionado no quadrante SE.

A segunda fase (DN+2) é representada igualmente por falhas e juntas abertas, pouco densas, com extensões métricas, com superfícies de ruptura rugosas, planares, preenchidas com calcita pouco fibrosa e por vezes clastos de calcopirita. As estrias de atrito e *steps* em geral marcam movimentos dextrógiros. Pouca cataclase está associada a este evento, porém nos veios de preenchimento é possível observar-se pequenas brechas. Os registros destas falhas foram mapeadas apenas nas rochas magmáticas da Pedreira Três Bocas.

Ambos os sistemas foram gerados por cisalhamento simples e podem ser facilmente ajustados ao modelo de fraturas utilizado, no caso o modelo de Riedel, mas não devem ser considerados progressivos entre si, apenas sucessivos, visto que há importante mudança no ângulo de incidência do eixo de paleotensão principal (σ_1), que está na posição N139/23 no caso da fase DN+1 e na posição N232/01 no caso da fase DN+2.

Tais eventos de deformação ocorreram no máximo após o Triássico, podendo eventualmente ter ocorrido – ou pelo menos reativado - após o Cretáceo, caso a fase DN+1 seja associado à tectônica de compressão do Diastrofismo (ou Tectônica) Juruá, descrito por Szatmari (1983) e Caputo (1984).

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, J. R. Estudo do vulcanismo básico da bacia do Amazonas. Rio de Janeiro: Petrobras, (Relatório Interno).1984.

ALMEIDA, C., PINHEIRO, R.V.L. O Papel das Falhas na História Tectônica do Domo de Monte Alegre, Bacia do Médio Amazonas, PA. In: PDPETRO, 4, **Anais...** Campinas, SP, 2007. pg. 01 a 08.

AMARAL, G. **Geologia Pré-Cambriana da Região Amazônica**. São Paulo. 212 p. Tese (Livre Docência) - USP/Instituto de Geociências, 1974.

ANGELIER, J. & MECHLER, P. Sur une méthode graphique de recherche des contraentes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits.Bull. Soc. Géol. France, 7:1309-1318. 1977.

ANJOS G. C., LOPES, E.L., VILLAS R.N. Estudo Geoquímico de águas da região da braquianticlinal de Monte Alegre (PA) com ênfase nas fontes termais. Geochim. Brasil., 17(2)091-105, 2003.

ARAUJO, J.F.V. *et al.*, Geologia da Folha SA.21 – Santarém, In: Brasil, Departamento Nacional de Produção Mineral, Projeto RADAMBRASIL, Folha SA.21 – Santarém, Rio de Janeiro, 1976 (Levantamento de Recursos Naturais, 10). 1976

ARAÚJO C.C., YAMAMOTO J.K., MADRUCCI V. Análise Morfoestrutural em área de ocorrência de arenito asfáltico, Bacia do Paraná, São Paulo. **Revista do Instituto Geológico São Paulo** v. 24, n.1/2, p. 25-41. 2003.

BEMERGUY, R.L.; COSTA, S. B.J.; HASUY,Y.; BORGES, M,S.; SOARES Jr, A.V. Structural geomorphology of the Brazilian Amazon region. Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG-Núcleo Norte, p. 245-258. 2002.

BONGIOLO, ABS. **Contribuição ao estudo da Bacia do Amazonas e seu embasamento através da Magnetometria e Gravimetria**. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná, 258p. 2011.

BREITBACH, J.W. Geology of the rio Cajati. Petrobras. Relatório Interno 210-A. 1957.

BRIGGS, I.C. Machine Contouring Using Minimum Curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p.39-48, 1974.

CAMPOS, J. N. P. e TEIXEIRA, L. B. Estilos Tectônicos da Bacia do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA ,35., 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. v.5, p. 2161-2172.

CAPUTO, M. V., RODRIGUES, R. e VASCONCELOS, D. N. N., Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas. Belém, PETROBRÁS – RENOR, n. p. (Relatório Técnico Interno, 641-A). 1971.

CAPUTO, M. V., RODRIGUES, R., VASCONCELOS, D. N. N., Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas – Histórico e Atualização, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Belém, Anais, Belém – Sociedade Brasileira de Geologia, v. 3, p. 35-46. 1972.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. PhD Thesis, Santa Barbara, California University, 583 p. 1984.

Caputo, M.V. Origem do alinhamento estrutural do Juruá e do Arco de Iquitos. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., 1985, Belém. **Anais...** Belém: SBG/Norte, 1985. P. 245 - 251.

CASTRO, P.J.M.; OLIVEIRA, E. Anomalias Gravimétricas Regionais do Médio e Baixo Amazonas. PETROBRAS/DEXPRO/DIVEX – C.I. 34/436. 1971.

CAROZZI A.V., ALVES R.J., CASTRO J.C. Controle tectônico sinsedimentar dos carbonatos Permo-Carboníferos das formações Itaituba e Nova Olinda da Bacia do Amazonas, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, **Anais**, 3:47-64. 1972.

CONCEIÇÃO, J. C. J., ZALÁN, P.V., DAYAN, H.. **Deformações em Rochas Sedimentares induzidas por Intrusões Magmáticas: Classificação e Mecanismos de Intrusão**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 7 (1/4), p. 57-91, 1993.

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Carta Geológica do estado do Pará. 2008.

COSTA, J. B. S.; PINHEIRO, R. V. L. ; JOÃO, X. S. J.; ARAÚJO, O. J. B.. Esboço Estrutural do Proterozóico Médio da Amazônia Oriental. **Bol. Mus. Para.** Emilio Goeldi. Série Ciências da Terra. 3: 9-23 1991.

COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BORGES, M.; BEMERGUI, R. L. Arcabouço Tectônico Mesozóico-Cenozóico da Região da Calha do Rio Amazonas. São Paulo. Editora da UNESP. Geociências, 14 (2):77-103 1995.

COSTA, J. B. S. HASUI, H. Evolução geológica da Amazônia. In COSTA, M. L. da; ANGÉLICA R.S. (coords.). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. Belém. FINEP. p. 15-90. 1997.

COSTA, A. R. A. **Tectônica Cenozóica e Movimentação Salífera na Bacia do Amazonas e suas Realções com a Geodinâmica das Placas da América do**

Sul, Caribe, Cocos e Nazca. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 237p. 2002.

CUNHA P.R.C., GONZAGA F.G., COUTINHO L.F.C., FEIJÓ F.J. Bacia do Amazonas. **Boletim Geociências Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 47-67. 1994.

CUNHA P.R.C. Correlação das sequências Eo-mesodevonianas da Bacia do Amazonas com outras bacias do Gondwana. In: J.H.G. Melo & G.J.S. Terra (eds.) **Correlação de sequências paleozóicas sul-americanas.** Ciência-Técnica-Petróleo, seção Exploração de petróleo, 20: p. 91-98. 2001.

DERBY, O.A. Contribuições para a geologia da região do Baixo Amazonas. Arquivo do Museu Nacional II. Rio de Janeiro, 2:77-104. 1878.

DE FREITAS, R. C. **Análise estrutural multimatemática do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 113p. 2005.

DEFFONTAINES, B.; CHIRWICS, J. Principles of drainage basin analysis from multisource data: applications to the structural analysis of the Zaire Basin. **Tectonophysics**, v. 194, p. 237-263. 1991.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.

FIGUEIRA, I.F.R., ROSTIROLLA S.P., FIGUEIRA E.G., FERREIRA F.J.F. Uso de geotecnologias para a análise de anomalias morfoestruturais na região do Domo De Monte Alegre – Pará. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 44. **Anais.** SBG p. 2008.

FIGUEIRA, I.F.R., FIGUEIRA E.G., SALAMUNI E., MANCINI F. Caracterização Morfoestrutural do Domo de Monte Alegre (PA). XI SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. Manaus. **Resumos Expandidos.** p. 2009.

GUERRA, A.T. Dicionário Geomorfológico. 8ª Edição. IBGE. Rio de Janeiro 446p. 1993.

GRAHN Y.; MELO J.H.G. Bioestratigrafia dos quitinozoários do Grupo Trombetas nas faixas marginais da bacia do Amazonas. **Relatório Interno da PETROBRAS**, 86p. 1990.

GRAHN Y. Silurian and Lower Devonian chitinozoan taxonomy and biostratigraphy of the Trombetas Group, Amazonas Basin, northern Brazil. **Bulletin of Geosciences**, v. 80 (4):245-276. 2005.

HANCOCK, P.L. **Continental Deformation**. Pergamon Press, Bristol, 421 pp. 1994.

HARTT, C.F. **Geology and Physical Geography of Brazil**. Robert E. Krieger Publ. Company, New York, Impressão de 1975, 620p. 1870.

Issler R.S. Esboço geológico-tectônico do Cráton Guaporé. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 28. **Anais**. p.659 a 665. 1974.

LANGE, F.W. Subdivisão biestratigráfica e revisão da coluna siluro-devoniana da bacia do baixo Amazonas. *In*: ATAS DO SIMPÓSIO SOBRE D BIOTA AMAZÔNIA. **Anais**. Rio de Janeiro: CNP, v.1 P.215-295. 1967.

LE PICHON, X., FRANCHETEAU J., BONIN J., Plate Tectonics, 302 pp., Elsevier, New York, N.Y., 1973.

LIMA M.I.C. Análise de drenagem e seu significado geológico / geomorfológico. Belém: 2002. 1 CD-ROM.

MATSUDA, N.S.; DINO, R.; WANDERLEY FILHO, J.R. Revisão litoestratigráfica do Grupo Tapajós, Carbonífero Médio – Permiano da Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 12, n. 2, p. 435-441. 2004.

MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; MENESES, P.R.; CSORDAS, S.M. Análise morfoestrutural com uso de imagens MSS/ Landsat e Radar para pesquisa de hidrocarbonetos no estado de São Paulo. Relatório **INPE-2445-RTR/015**. São José dos Campos, 170p. 1982.

MELO, V.P. e GOUVEIA, V.A. Concentração de radônio-222 nos ambientes internos das residências do município de Monte Alegre – PA. *In*: IV ENEN-Join Nuclear conferences, 1997.

MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A. Sedimentary basins of South América. *In*: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. (Ed.) **Tectonic Evolution of South America**. IGC, 31, Rio de Janeiro, p.389-449. 2000.

MILANI, E.J.; ZALÁN, P.V. An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 199- 205. 1999.

MINTY, B. R. S. The fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.

MIRANDA, F. P. Sensoriamento remoto na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Amazonas. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 268-291, Out./Dez. 1983.

MONTALVÃO. R.M.G.; OLIVEIRA. A.S. **Geologia Branquianticlinal de Monte Alegre e da Rodovia Monte Alegre – Prainha**. Belém, Projeto Radam Brasil , Folha SA.21, DNPM, 409p. 1975.

MORGAN, W. J., Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94: 123-139. 1983.

MOURA, P., WANDERLEY, A. Noroeste do Acre: reconhecimentos geológicos para petróleo. B. Serv. From. Prod. Mineral, Rio de Janeiro. 26:11-16. 1938.

NOGUEIRA, A.C.R., TRUCKENBRODT, W. SOARES E.A.A. O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) da Bacia do Amazonas, Região de Presidente Figueiredo. **Revista Brasileira de Geociências** v. 29, p. 135-140. 1999.

OLIVEIRA S.F., LIMA M.R. Acrítarcas Silurianos da Formação Trombetas, Bacia do Amazonas. **Revista Instituto Geológico**, São Paulo 8-10, 11(1), 43-50. 1990.

O'LEARY D.W., FRIEDMAN J.D., POHN H.A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society American Bulletin*, vol. 87, p. 1463-1469. 1976.

PASTANA, J.M.N., SOUZA, A.M.M., VALE, A.G.V., FARIA, C.A.S., SANTOS, M.E., ASSUNÇÃO, P.R.S., FRIZO, S.J., Lobato, T.A.M. **Projeto sulfeto de Alenquer, Monte Alegre, relatório final**. Ministério das Minas e Energias. Departamento Nacional de Produção Mineral, convênio DNPM/CPRM. 1978.

PASTANA, S. M. N **Síntese geológica e favorabilidade para tipos de jazimentos minerais do Município de Monte Alegre-PA**. Belém, CPRM/PRIMAZ. 34p. Relatório Técnico. 1999.

PENCK, W. *Morphological Analysis of Landforms*. Londres: McMillan, 1953.

PORSHE, E. **Tectônica da faixa de dobramentos do Juruá; Bacia do Alto Amazonas, Brasil: Um modelo estrutural**. Dissertação (Mestrado) Ouro Preto, UFOP. 124p. 1985.

PRICE, N.J.; COSGROVE, J.W. *Analysis of geological structures*, Cambridge: Univ. Press, 1990.

RAGAN, D.M. *Structural geology: an introduction to geometrical techniques*, 3 ed. Malloy Lithographing, 1985.

RESENDE M, CURI N, RESENDE B.S de & CORRÊA GF. *Pedologia: bases para distinção de ambientes*. Viçosa, MG, NEPUT, 338p. 2002.

REZENDE, W. M. O mecanismo de intrusões de diabásio nas bacias paleozóicas do Amazonas e do Maranhão. Rio de Janeiro: Petrobras, (Relatório Interno).1971.

REZENDE, W.M,DE.; BRITO, C.G. de. Avaliação Geológica da Bacia Paleozóica do Amazonas. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracaju. **Anais**, p. 228-245. 1973.

RIEDEL, W. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Ein beitrag zum problem der fiederspalten. Zentralblatt fur Mineralogie. Verlagsbuchhandlung, v.1919b, p.354-368. 1929.

RICCOMINI C. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-Gondwânicos da porção centro-oriental do estado de São Paulo e áreas vizinhas. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, 100 p, 1995.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. In: Revista do Departamento de Geografia. São Paulo: Edusp. n.6, 17-30p. 1992.

SCHEFFLER S.M., FERNANDES A.C.S., FONSECA V.M.M. Crinoidea da Formação Maecuru (Devoniano da Bacia do Amazonas), estado do Pará, Brasil. Revista Brasileira de Paleontologia. 9(2): 235-242. 2006.

SENA COSTA, J.B.; BEMEGURGUY, R.L.; HASUI,Y.; BORGES, M.da.S.; FERREIRA JÚNIOR, C.R.P.; BEZERRA, P.E.L.; COSTA, M.L.; FERNANDES, J.M.G. Neotectônica da região amazônia: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. Geonomos. 4(2):23-24. 1996.

SENA COSTA, J.B.; HASUI,Y. Evolução Geológica da Amazônia. Contribuições à Geologia da Amazônia, 1:15-89. 2000.

SHERIFF R.E. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Third Edition, 384 p. 1999.

SOARES, P.C.; LUZ, M. E. R.; REDAELLI, R.; GUERRA, S. M. S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília,. **Anais...** Brasília, DF: CNPQ, 1982. v. 1, p.157-168.

STEREONET. Geological Software. Tromsø, Norway, 1992-1995. Download.

STRUGALE, M. **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico): Implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 124 p., 2002.

SUMMERFIELD M.A. Global Geomorphology: an introduction to the study of landforms. New York: Longman Scientific & Technical, 537 p. 1993.

SZATMARI, P. **Amazon rift and Pisco-Juruá fault: Their relation to the separation of North América from Gondwana.** *Geology*, 11 (5): 300-304. 1983.

TEIXEIRA, W. **Significação tectônica do magmatismo anorogênico básico e alcalino na região amazônica.** São Paulo. 99 p. Dissertação de Mestrado em Geologia - USP / Instituto de Geociências, 1978.

THOMAZ FILHO, A.; CORDANI, U. G.; MARINO, O. Idades K/Ar de rochas basálticas da bacia amazônica e sua significação tectônica regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: SBG, 1974. v. 6, p. 273-278.

TRZASKOS B. **Anisotropia estrutural de arenitos do Grupo Itararé, Permocarbonífero da Bacia do Paraná.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 151p. 2006.

VASQUEZ, M.L., ROSA-COSTA L.T., SILVA C.M.G., RICCI P.S.F., BARBOSA, J.P.O., KLEIN, E.L., LOPES, E.C.S., MACAMBIRA, E.M.B., CHAVES C.L., CARVALHO J.M.A., OLIVEIRA J.G.F., ANJOS G.C., SILVA, H.R. Unidades Litoestratigráficas. In Vasquez, M.L.; Rosa-Costa L.T. **Geologia e Recursos Minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas. Companhia de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil**, 113-215. 2008.

WANDERLEY FILHO, J. R. **Evolução estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento.** Belém. 125 p. Dissertação de Mestrado em Geologia - UFPA, 1991.

WIN_TENSOR version 2.2.8 Last Updated 03/01/2011: Software designed by Dr. Damien Delvaux, Royal Museum for Central Africa, Department of Geology and Mineralogy.

ZALÁN, P.V. Influence of Pre-Andean Orogenies on the Paleozoic Intracratonic Basins of South America. In: Simposio Bolivarano, 1991, Bogotá, Memorias, Tomo I, Trabajo 7.